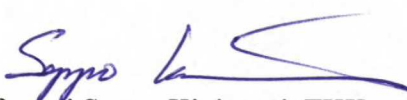


Liisa Virta
Teknillinen Korkeakoulu
Materiaalitekniikan osasto
Materiaalien muokkauksen ja lämpökäsittelyn laboratorio


Nuorrutusterästen nopeutettu sammutus

Diplomityö, joka on jätetty tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten
Espoossa 4.12.2006

Työn valvoja:


Professori Seppo Kivivuori, TKK

Työn ohjaaja:


DI Matti Vestman, Sandvik Mining and Construction Oy,
Breakers Lahti

Alkusanat

Diplomityö on tehty Sandvik Mining and Construction Oy, Breakers Lahdelle. Koekarkaisut on tehty Pieksämäellä Bodycote Lämpökäsittely Oy:n tiloissa. Simulointi on tehty Teknillisessä Korkeakoulussa Materiaalien muokkauksen ja lämpökäsittelyn laboratoriossa. Työhön on saatu tukea Teknillisen Korkeakoulun Tukisäätiöltä.

Työni valvojaa professori Seppo Kivivuorta haluan kiittää työhöni liittyvistä järjestelyistä ja hänen työtäni kohtaan osoittamasta mielenkiinnosta. Työni ohjaajaa Matti Vestmania haluan kiittää arvokkaista neuvoistaan työni eri vaiheissa.

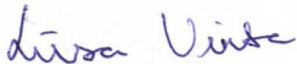
Sandvik Mining and Construction Oy, Breakers Lahtea haluan kiittää mielenkiintoisesta aiheesta ja saamastani taloudellisesta tuesta. Koko henkilökuntaa, erityisesti karkaisimon väkeä, haluan kiittää valaisevista keskusteluista ja saamastani käytännön avusta.

Bodycote Lämpökäsittely Oy:tä haluan kiittää diplomityöhöni liittyneiden koekarkaisujen suorittamisesta.

Materiaalien muokkauksen ja lämpökäsittelyn laboratorion henkilökunnasta haluan kiittää erityisesti Tuomas Katajarinnettä avusta jäähtymisnopeuksien ja kovuuksien simuloinnissa.

Isääni Jouko Virtaa haluan kiittää koko opiskeluaikaisesta tuesta ja kannustuksesta sekä mielenkiinnostaan diplomityötäni kohtaan.

Lahti, joulukuu 2006



Liisa Virta

Tekijä:	Liisa Virta		
Diplomityö:	Nuorrutusterästen nopeutettu sammutus		
Päivämäärä:	4.12.2006	Sivumäärä:	100+1
Professori:	Materiaalien muokkaus ja lämpökäsittely	Koodi:	Mak-65
Valvoja:	Professori Seppo Kivivuori		
Ohjaaja:	DI Matti Vestman		

Työssä perehdyttiin nopean sammutuksen teknologiaan. Teoriaosassa esitettiin ensin niin sanottu perinteinen karkaisu, minkä jälkeen perehdyttiin intensiiviseen sammutukseen. Tarkoituksena oli tutkia voiko öljyyn karkaistavan runsaammin seostetun ja siten kalliimman 34CrNiMo6 -teräksen korvata niukemmin seostetulla 42CrMo4 -teräksellä sekä mitä hyötyä niukemmin seostetun teräksen jäähtymisnopeuden lisäämisellä on sen ominaisuuksiin. Tavoitekovuustasoksi valittiin 45 HRC. Toinen mielenkiinnon kohde oli selvittää keskeytetyllä karkaisulla saatavat hyödyt. Lisäksi numeerisen simuloinnin hyödyntämisen mahdollisuuksia selvitettiin.

Kokeellisessa osassa tutkittiin suolaveteen sammutettujen halkaisijaltaan 50...100 mm olevien teräskappaleiden kovuusjakaumat, iskutkeys ja jäännösjännitystila. Lisäksi tarkasteltiin kappaleissa karkaisun aikana tapahtuvia mitta- ja muodonmuutoksia. Kokeissa käytettiin kahta erilaista sammutustapaa (keskeytetty ja kerralla kylmäksi). Sammutuksen keskeytys pyrittiin suorittamaan kappaleen keskustan lämpötilan ollessa 400 °C.

Intensiivisen sammutuksen alueelle ei päästä tutkituilla halkaisijoilla, kun sammutus suoritetaan kokeissa käytettyyn tavalliseen sammutusaltaaseen. Silti pintaan saadaan hyvä puristusjäännösjännitystila, jolla on edullinen vaikutus kappaleen kestävyYTEEN. Keskeytetyllä sammutuksella ei saatu muutoksia materiaaliominaisuuksiin. Syynä tähän on keskeytyksen liian myöhäinen ajankohta.

Tuloksista selvisi, että runsaammin seostettu ja siten kalliimpi öljysammutettava teräs 34CrNiMo6 voidaan korvata halvemmalla 42CrMo4 -teräksellä kovuuden perusteella ainakin halkaisijaan 80 mm saakka. Korvaaminen 100 mm asti onnistuu, mikäli käyttökohde on sellainen, että tavoitekovuudesta voidaan tinkiä kappaleen keskustassa. Kovuustasoa ei juurikaan saada parannettua, mutta kappaleiden jäännösjännitystila saadaan huomattavasti paremmaksi. Iskutkeysarvot huononevat. Sammuttamalla niukemmin seostettu teräs öljyn sijasta suolaveteen, saadaan sen kovuustasoa nostettua ja jäännösjännitystilaa parannettua.

Saadut simuloinnin tulokset eivät vastaa mitattuja tuloksia. Syynä on todennäköisesti käytetyn materiaalidatan epätarkkuus.

Author:	Liisa Virta		
Thesis:	Rapid Quenching of Tempering Steels		
Date:	4.12.2006	Number of pages:	100+1
Professorship:	Processing and Heat Treatments of Materials	Code:	Mak-65
Supervisor:	Professor Seppo Kivivuori		
Instructor:	M. Sc. Matti Vestman		

The aim for this thesis was to study rapid quenching and its technology. In the theory part of the thesis traditional quenching was first described and after that the intensive quenching. The aim was to research the possibility to replace oil quenched, higher alloyed and expensive 34CrNiMo6 steel with lower alloyed 42CrMo4 steel, and the advantages of the rapid quenching of 42CrMo4 steel. The target hardness was 45 HRC. Also the possibility to use numerical simulation of quenching was investigated.

In the experimental part the hardness, impact strength and residual stresses of the brine quenched steel parts with diameters of 50...100mm were investigated. In addition the distortions and changes in dimensions were studied. In experimental quenching two different kinds of methods were used. The first one was to quench the charge continuously to the quenchant temperature and the other was interrupted quenching. The interruption was selected to be at the core temperature of 400°C.

According to the experiments it is not possible to reach the cooling rate of intensive quenching by quenching the used specimens in ordinary quenching tank. But it is still possible to get high compressive residual stresses at the surface of the steel parts, which provides significant service life improvement. In the interrupted quenching the interruption moment may have been too late, because the material properties were not affected at all.

It was found out that by quenching lower alloyed steel in brine instead of oil it is possible to improve hardness and residual stress state. In the steel parts investigated more alloyed and expensive oil quenched 34CrNiMo6 steel can be replaced with less expensive 42CrMo4 steel at least up to diameter of 80mm. Replacing up to 100mm is possible, if the application will allow core hardness less than the target hardness. It is not possible to improve hardness of the components but residual stress state can be improved significantly. The impact strength will be reduced.

The results of the numerical simulation did not correspond with experimental tests. The reason is probably the inaccuracy of the used material data.

1	Johdanto.....	3
2	Karkaisu.....	3
2.1	Karkaisun historiaa.....	4
2.2	Karkenevuus.....	5
2.2.1	Ideaalinen kriittinen läpimitta	7
2.3	Martensiitin muodostuminen.....	8
2.4	Karkaisussa saatavat materiaaliominaisuudet	9
2.4.1	Kovuus.....	10
2.4.2	Sitkeys	11
2.5	Austenitointi	12
2.6	Sammutus	13
2.7	Sammutusväliaineet.....	14
2.7.1	Karkaisuöljyt	16
2.7.2	Vesi ja vesiliuokset.....	17
2.7.3	Kaasut.....	19
2.8	Jäähtymiskäyrät	19
3	Karkaisussa tapahtuvat mitta- ja muodonmuutokset.....	21
3.1	Karkaisussa syntyvät jännitykset.....	22
3.1.1	Lämpöjännitykset	22
3.1.2	Transformaatiojännitykset.....	23
3.2	Sammutusolosuhteiden vaikutukset	24
3.2.1	Sekoitus	25
3.2.2	Sammutusväliaine	26
3.2.3	Kappaleiden panostus.....	26
4	Lämmönsiirto sammutuksessa	27
4.1	Sammutuksen jäähtymisvaiheet	28
4.1.1	Höyrykalvovaihe	29
4.1.2	Kiehuntavaihe.....	30
4.1.3	Konvektiovaihe	30
4.1.4	Sammutusväliaineen sekoituksen vaikutus jäähtymisvaiheisiin	30
4.1.5	Sammutusväliaineen lämpötilan vaikutus jäähtymisvaiheisiin.....	31
5	Intensiivinen sammutus.....	32
5.1	Intensiivisen sammutuksen eri menetelmät.....	34
5.2	Puristusjännitysten muodostuminen.....	36
5.3	Ylilujittuminen	38
5.4	Karkeusmuutokset.....	39
5.5	Martensiitin muodostuminen intensiivisessä sammutuksessa.....	40
5.6	Koetuloksia kirjallisuudesta	42
6	Karkaisun simulointi	43
6.1	Simulointiin tarvittava data	44
6.2	Jäähtymisnopeuksien simulointi.....	45
6.3	Faasimuutosten simulointi.....	46
6.4	Mitta- ja muodonmuutosten simulointi	47
7	Kokeellisen osuuden työn tarkoitus	48
8	Kokeet ja niiden suoritus.....	49
8.1	Koemateriaalit	49

8.2	Koekappaleet	51
8.3	Lämpökäsittelyt	53
8.4	Suoritetut mittaukset ja kokeet	54
8.4.1	Sammutusaltaan jäähdytystehon mittaus	54
8.4.2	Todellisten jäähdytysnopeuksien mittaus koekappaleista	55
8.4.3	Pintakovuus ja kovuusjakauma	56
8.4.4	Jäännösjännitys jakauma	57
8.4.5	Iskusitkeys	57
8.4.6	Mitta- ja muodonmuutosten määrittäminen	58
8.4.7	Mikrorakennetarkastelu	59
9	Koetulokset	60
9.1	Sammutusaltaan jäähdytysteho	60
9.2	Koekappaleiden todelliset jäähdytysnopeudet	60
9.3	Pintakovuus ja kovuusjakauma	63
9.4	Jäännösjännitys jakauma	68
9.5	Iskusitkeys	69
9.6	Mitta- ja muodonmuutokset	69
9.7	Mikrorakenne	74
10	Simulointi	74
11	Tulosten tarkastelu	82
11.1	Koekarkaisun tulokset	82
11.1.1	Sammutusaltaan jäähdytysteho	82
11.1.2	Koekappaleiden todelliset jäähdytysnopeudet	85
11.1.3	Pintakovuus ja kovuusjakauma	87
11.1.4	Jäännösjännitys jakauma	89
11.1.5	Iskusitkeys	90
11.1.6	Mitta- ja muodonmuutokset	91
11.1.7	Mikrorakenne	92
11.2	Simulointi	92
12	Yhteenveto	93
13	Kirjallisuusviitteet	96

1 Johdanto

Teräksen karkaisussa käytettävät sammutustekniikat voidaan jakaa hitaisiin ja nopeisiin menetelmiin. Hitaita sammutusmenetelmiä, kuten erilaisia kaasusammutusmenetelmiä on kehitetty ja tutkittu paljon /1, 2/. Hitaan sammutuksen etuna on kappaleen tasainen jäähtyminen, jolloin riski halkeiluun sekä mitta- ja muodonmuutosten syntyyn pienenee huomattavasti. Tällöin karkaistavan teräksen on oltava riittävän karkenevaa, runsaasti seostettua ja siten kallista. Nopeaa sammutusta ei juurikaan käytetä, vaikka siinä voitaisiin käyttää huomattavasti matalammin seostettuja ja siten halvempia teräslaatuja. Nopean sammutuksen pelätään johtavan suuriin mitta- ja muodonmuutoksiin sekä halkeiluun. Nopean sammutuksen etuna on käytettävä sammutusväliaine, joka on vesi. Vesi on erittäin tehokas sammutusväliaineena ja sen tehokkuutta voidaan edelleen nostaa lisäämällä siihen suolaa. Vesi on myös ympäristöystävällinen vaihtoehto yleisesti käytetylle öljylle.

Pinnan suuret puristusjäännösjännitykset parantavat kappaleen väsymiskestävyyttä sekä iskusitkeyttä. Hiiletyskarkaisua ja kuulapuhallusta käytetään usein tässä tarkoituksessa /3/. On kuitenkin olemassa myös toinen tapa, jolla kappaleen pintaan saadaan suuri puristusjäännösjännitystila. Kyseinen menetelmä on suhteellisen vähän tunnettu intensiivinen sammutus, jonka N.I. Kobasko kehitti jo lähes 40 vuotta sitten. Se on nopean sammutuksen menetelmä, jolla parannetaan kappaleen mekaanisia ominaisuuksia ja samalla vältetään mitta- ja muodonmuutoksilta. Intensiivisessä sammutuksessa pinnan suuret puristusjäännitykset saadaan aikaan erittäin nopealla ja tasaisella jäähdytyksellä austenitointilämpötilasta. Menetelmän onnistumisen edellytyksenä on sammutuksen oikea-aikainen keskeytys pinnan puristusjäännitysten ollessa maksimiarvossaan. /4/

Tämän työn teoriaosassa tarkastellaan ensin niin sanottua perinteistä sammutusta, minkä jälkeen siirrytään tarkastelemaan intensiivistä sammutusta. Lopuksi vertaillaan näitä kahta sammutustapaa keskenään. Työn kokeellisessa osassa keskitytään nopeaan sammutukseen, koska sitä käyttämällä pystytään siirtymään vähemmän seostettuihin ja siten halvempiin teräslaatuihin. Sammutusväliaineena on laimea suolavesiliuos. Saatuja tuloksia verrataan öljykarkaisussa saatuihin tuloksiin. Tavoitteena on selvittää tavanomaisella panosprosessilla toteutettavissa olevan nopeutetun sammutuksen vaikutus kappaleiden lujuusarvoihin sekä saada arvio nopeutetun sammutuksen soveltuvuudesta tuotantoprosessiin. Lisäksi tarkastellaan miten lähelle N.I. Kobaskon määrittämää intensiivisen sammutuksen aluetta päästään.

Lopuksi selvitetään hieman tietokoneavusteisen simuloinnin käyttömahdollisuutta lämpökäsittelyn suunnittelussa.

2 Karkaisu

Teräskappaleet lämpökäsitellään, jotta niiden ominaisuudet saadaan muutettua halutunlaisiksi tiettyä käyttötarkoitusta varten. Karkaisu on yleinen

lämpökäsittelymenetelmä, jolla pyritään lujittamaan terästä. Siinä on aina kaksi vaihetta, jotka ovat austenitointihehkutus ja sammutus. Sitkeyttä parantava päästö on karkaisun kolmas vaihe, joka suoritetaan kaikille muille teräslaaduille paitsi niukkahiilisille suorasammutusteräksille. Niukkahiiliset suorasammutusteräokset (hiilipitoisuus $\leq 0,10$ %) eivät tarvitse päästöä, koska niiden rakenne sammutuksen jälkeen on sitkeää sälemartensiittia matalan hiilipitoisuuden ansiosta. /5/

Karkaisun tarkoituksena on saada teräksen mikrorakenne martensiitiksi. Martensiitti on kovaa, mutta myös haurasta. Martensiitin kovuus riippuu lähes yksinomaan teräksen hiilipitoisuudesta. Suuri kovuus yhdistetään yleisesti suureen lujuuteen sekä hyvään väsymis- ja kulumiskestävyyteen /6/. Tämän takia karkaisua käytetään muun muassa erilaisten koneenosien, kuten hammaspyörien, ja työvälineiden lämpökäsittelyssä.

Karkaisulla ei pyritä pelkästään parantamaan teräksen mikrorakennetta, kovuutta, lujuutta ja sitkeyttä, vaan sillä pyritään myös hallitsemaan kappaleeseen syntyvää jäännösjännitystilaa. Jäännösjännitysten jakauma ja etenkin kappaleen pinnalla vallitseva jäännösjännitystila vaikuttavat kappaleen käyttöikänsä. Karkaisun yhteydessä tapahtuvat muodonmuutokset vaikuttavat puolestaan huomattavasti työstökustannuksiin.

Karkaisussa yleisiä ongelmia ovat karkaistavan kappaleen halkeilu, suuret mitta- ja muodonmuutokset, haitalliset jäännösjännitykset sekä epätasainen kovuusjakauma. Jotta nämä ongelmat voidaan välttää, täytyy karkaistavan kappaleen jäähtymisen olla tasaista sammutuksen aikana /7/.

Karkaisussa esiintyvien ongelmien välttämiseksi on kehitetty tietokoneavusteisia simulointiohjelmia, joilla voidaan mallintaa kappaleessa karkaisun aikana tapahtuvia muutoksia. Kyseiset mallit ovat usein FEM:iin (Finite Element Method) perustuvia numeerisia simulointeja, joiden avulla on mahdollista ennustaa lämpökäsittelyssä tapahtuvia muutoksia monimutkaistenkin kappaleiden mikrorakenteessa, jännityksissä sekä venymissä. Simuloimalla saadut tulokset ovat yleisesti melko samanlaisia kuin käytännön kokeista saadut edellyttäen, että käytetyt lähtöarvot ovat riittävän tarkkoja. /8/

2.1 Karkaisun historiaa

Karkaisu on tunnettu jo vuosituhansien ajan ja yhtä kauan se on myös askarruttanut ihmisten mieltä. Lähteen /9/ mukaan karkaisulla on 3500-vuotinen historia. Toisessa lähteessä /10/ mainitaan ensimmäisten merkintöjen karkaisusta olevan vuodelta 800 eKr. Siinä mainitaan, että karkaisusta ei haluttu puhua enenkään vuodesta 400 eKr. vuoteen 1500 jKr., koska haluttiin suojella seppien ammattitaitoa. Sammutusväliaineiden välillä on tiedetty olevan eroa karkaisun varhaisista ajoista lähtien. Kiinalaiset tekstit muun muassa kertovat kuinka eri paikasta otettujen vesien välillä on eroa karkaisun kannalta. Merkintöjä eläimen virtsan ja rasvan käytöstä sammutusväliaineena erilaisten jäähtymisnopeuksien aikaansaamiseksi on olemassa varhaisista ajoista lähtien. Japanilaiset olivat erittäin kehittyneitä metallurgian alalla. Heidän tapaansa valmistaa miekkojaan arvostetaan vielä tänäkin päivänä. He osasivat kontrolloida

jäähtymisnopeutta terän eri kohdissa. Saksalaisen munkin kirjoittama teos erilaisista sammutusväliaineista 1100-luvulla on Euroopan ensimmäisiä karkaisuun liittyviä merkittäviä teoksia. Kyseisessä teoksessa muun muassa kerrotaan pienen punatukkaisen pojan virtsan olevan parempi sammutusväliaine kuin tavallinen vesi. /10/

Ennen 1900-lukua kappaleet karkaistiin ilmaan, veteen sekä eläin- tai kasvisöljyihin. 1900-luvun alkupuolella ruvettiin ymmärtämään paremmin itse karkaisuprosessia sekä sen aikana tapahtuvia ilmiöitä. Ainakin vuodesta 1924 lähtien on ollut tiedossa mitä tapahtuu sammutuksen yhteydessä esiintyvissä eri sammutusvaiheissa, jotka tänä päivänä tunnetaan nimiltä höyrykalvo-, kiehun ja konvektiovaihe. Lämpökäsittely on kehittynyt vuosien saatossa keskiaikaisesta pajasta moderniin laitokseen, kuva 1. Vaikka ymmärrys siitä, mitä karkaisun aikana tapahtuu, on kasvanut valtavasti, ei prosessia silti vielä täysin tunneta. /11/



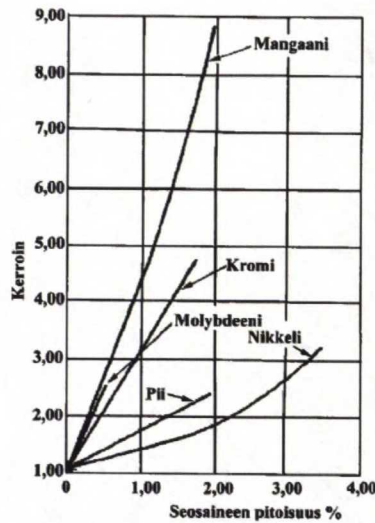
Kuva 1 Keskiaikainen lämpökäsittelypaja /12/ ja moderni lämpökäsittelylaitos /5/

2.2 Karkenevuus

Karkenevuus kuvaa teräksen taipumusta muuttua rakenteeltaan martensiittiseksi sammutuksessa. Teräksen karkenevuuteen vaikuttavat teräksen hiili- ja seosainepitoisuus sekä austeniitin raekoko ja karkaisulämpötila. Sammutusväliaineen valintaan vaikuttaa oleellisesti karkaistavan teräksen karkenevuus. Seosaineet parantavat karkenevuutta, joten seostetut teräkset saadaan martensiittisiksi hitaammassakin jäähtytyksessä. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että suuremmatkin kappaleet karkenevat hitaammassa sammutuksessa käytettäessä seostettuja teräksiä.

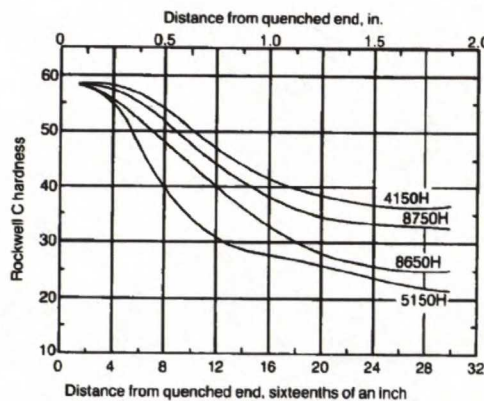
Teräksissä tavallisimmin käytetyt seosaineet (mangaani, kromi, molybdeeni, pii ja nikkeli) parantavat teräksen karkenevuutta lähes suoraan verrannollisesti seosainepitoisuuteen. Boori on poikkeus, koska jo hyvin pienet booripitoisuudet parantavat karkenevuutta huomattavasti, mutta tätä suuremmat määrät eivät enää lisää sitä. /5/

Kuvassa 2 on joidenkin teräksissä yleisesti käytettävien seosaineiden vaikutuskertoimet karkenevuuteen.



Kuva 2 Teräksissä yleisesti käytettävien seosaineiden vaikutus karkenevuuteen /5/

Teräksen karkenevuus määritetään yleensä kovuuden perusteella. Yleisin kovuusmittaukseen perustuva karkenevuuden määrittystapa on jominykoe /13/. Jominykokeessa tutkittavasta teräksestä valmistettu standardin mukainen koessaiuva austenitoidaan ja sammutetaan tämän jälkeen otsapintaan suunnatulla vesisuihkulla. Otsapinta jäähtyy näin äärettömän nopeasti ja koessaiuvan toinen pää jäähtyy puolestaan ilmajäähdystystä vastaavalla nopeudella. Tämän seurauksena koekappaleen jäähtymisnopeus vaihtelee eri kohdissa, jonka seurauksena myös saatava kovuustaso vaihtelee. Koessaiuvasta mitataan kovuudet tietyin välimatkoin otsapinnasta. Tulokset ilmoitetaan jominykäyränä, jossa x-akselilla on etäisyys otsapinnasta ja y-akselilla kovuus. Mikäli saatu jominykäyrä on jyrkästi laskeva, sanotaan teräksen olevan matalaan karkeneva. Loivasti laskeva jominykäyrä kuvaa puolestaan syvään karkenevaa terästä. Tämän perusteella voidaan sanoa kuvassa 3 olevista teräksistä laadun 4150H:n olevan syvään karkeneva ja 5150H:n puolestaan matalaan karkeneva. Erittäin syvään karkenevan teräksen jominykäyrästä tulee lähes suora viiva.



Kuva 3 Eri terästen jominykäyriä /6/

Toinen tapa teräksen karkenevuuden määrittämiseksi on ottaa karkaistusta kappaleesta poikkileikkaus ja syövyttää hiottu pinta sopivalla syövytteellä. Martensiittinen pintakerros ei syövy, minkä seurauksena karennut pintakerros näkyy kirkkaana sisustan syöpyessä tummaksi. /5/

2.2.1 Ideaalinen kriittinen läpimitta

Karkenevuutta tarkastellaan teoreettisesti yleisesti ideaalisen kriittisen läpimitan D_I avulla. Se tarkoittaa terästangon halkaisijaa, jonka keskiakseli vielä saavuttaa martensiittipitoisuuden vähintään 50 %. Ideaalinen kriittinen läpimitta saadaan laskettua ottamalla huomioon seosaineiden määrät, teräksen hiilipitoisuus sekä austeniitin raekoko. Austeniitin raekoko vaikuttaa karkenevuuteen siten, että raerajojen yhteenlaskettu pinta-ala kasvaa raekoon pienentyessä, jolloin perliitin ydintymiselle on enemmän paikkoja. Eräs muoto kaavasta ideaaliselle kriittiselle läpimitalle /14/ on

$$D_I = D_{I \text{ base}} \cdot f_{Mn} \cdot f_{Si} \cdot f_{Cr} \cdot f_{Mo} \cdot f_{Ni} \quad (1)$$

jossa f_x :t ovat kullekin seosaineelle ominaisia karkenevuuteen vaikuttavia kertoimia ja $D_{I \text{ base}}$ on kerroin, johon vaikuttavat teräksen hiilipitoisuus sekä austeniitin raekoko. Sekä $D_{I \text{ base}}$:n että f_x :ien arvoja on taulukoitu ja niistä on myös piirretty kuvaajia. Taulukossa 1 on esimerkki raekoon sekä joidenkin seosaineiden vaikutuskertoimia ideaalisen kriittisen läpimitan laskemiseksi kaavan (1) mukaisesti.

Taulukko 1 $D_{I \text{ base}}$ ja f_x -arvoja ideaalisen kriittisen läpimitan laskemiseksi /14/

Carbon, %	Base ideal diameter, $D_{I \text{ base}}$, at following carbon grain size			Alloying factor, f_x , where element, X, is				
	No. 6	No. 7	No. 8	Mn	Si	Ni	Cr	Mo
0.05	0.0814	0.0750	0.0697	1.167	1.035	1.018	1.1080	1.15
0.10	0.1153	0.1065	0.0995	1.333	1.070	1.036	1.2160	1.30
0.15	0.1413	0.1315	0.1212	1.500	1.105	1.055	1.3240	1.45
0.20	0.1623	0.1509	0.1400	1.667	1.140	1.073	1.4320	1.60
0.25	0.1820	0.1678	0.1560	1.833	1.175	1.091	1.54	1.75
0.30	0.1991	0.1849	0.1700	2.000	1.210	1.109	1.6480	1.90
0.35	0.2154	0.2000	0.1842	2.167	1.245	1.128	1.7560	2.05
0.40	0.2300	0.2130	0.1976	2.333	1.280	1.146	1.8640	2.20
0.45	0.2440	0.2259	0.2090	2.500	1.315	1.164	1.9720	2.35
0.50	0.2580	0.2380	0.2200	2.667	1.350	1.182	2.0800	2.50
0.55	0.273	0.251	0.231	2.833	1.385	1.201	2.1880	2.65
0.60	0.284	0.262	0.241	3.000	1.420	1.219	2.2960	2.80
0.65	0.295	0.273	0.251	3.167	1.455	1.237	2.4040	2.95
0.70	0.306	0.283	0.260	3.333	1.490	1.255	2.5120	3.10
0.75	0.316	0.293	0.270	3.500	1.525	1.273	2.62	3.25
0.80	0.326	0.303	0.278	3.667	1.560	1.291	2.7280	3.40
0.85	0.336	0.312	0.287	3.833	1.595	1.309	2.8360	3.55
0.90	0.346	0.321	0.296	4.000	1.630	1.321	2.9440	3.70
0.95	...	...	...	4.167	1.665	1.345	3.0520	...
1.00	...	...	...	4.333	1.700	1.364	3.1600	...

Karkenevuuden määrittämiseksi täytyy ensin määrittää teräksen ASTM raekoko sekä selvittää teräslaadun kemiallinen koostumus. Tämän jälkeen taulukoista tai kuvaajista voidaan määrittää $D_{I \text{ base}}$ sekä seosaineiden karkenevuuteen vaikuttavat kertoimet, jonka jälkeen voidaan laskea teräslaadun ideaalinen kriittinen läpimitta edellä olevan kaavan mukaisesti.

2.3 Martensiitin muodostuminen

Martensiitin muodostuminen ei vaadi diffuusiota vaan se muodostuu suoraan austeniitista leikkautumalla. Tämän seurauksena sen koostumus on täysin sama kuin austeniitin, aina hiilipitoisuuteen 2 % saakka /6/. Leikkautuminen on nopea prosessi, joten martensiittia muodostuu suurillakin jäähtymisnopeuksilla. Martensiitin muodostumiseksi lämpötilan täytyy laskea jatkuvasti. Sen muodostuminen alkaa lämpötilassa M_s , joka vaihtelee teräksen koostumuksen mukaan. Teräksen hiilipitoisuuden lisääntyessä M_s -lämpötila laskee voimakkaasti. Hiilen lisäksi myös kaikki muut seosaineet, kobolttia lukuun ottamatta, laskevat kyseistä lämpötilaa. M_s -lämpötilan laskemiseksi on olemassa useita erilaisia kaavoja, joilla saatavat tulokset tosin vaihtelevat /6/. Taulukossa 2 on listattuna näitä kaavoja.

Taulukko 2 Kaavoja martensiitin muodostumisen alkamislämpötilan laskemiseksi /6/

Investigators	Date (Ref)	Equation
Payson and Savage	1944 (3.12)	$M_s (^{\circ}\text{F}) = 930 - 570\text{C} - 60\text{Mn} - 50\text{Cr} - 30\text{Ni} - 20\text{Si} - 20\text{Mo} - 20\text{W}$
Carapella	1944 (3.13)	$M_s (^{\circ}\text{F}) = 925 \times (1 - 0.620\text{C})(1 - 0.092\text{Mn})(1 - 0.033\text{Si})(1 - 0.045\text{Ni})(1 - 0.070\text{Cr})(1 - 0.029\text{Mo})(1 - 0.018\text{W})(1 + 0.120\text{Co})$
Rowland and Lyle	1946 (3.14)	$M_s (^{\circ}\text{F}) = 930 - 600\text{C} - 60\text{Mn} - 50\text{Cr} - 30\text{Ni} - 20\text{Si} - 20\text{Mo} - 20\text{W}$
Grange and Stewart	1946 (3.15)	$M_s (^{\circ}\text{F}) = 1000 - 650\text{C} - 70\text{Mn} - 70\text{Cr} - 35\text{Ni} - 50\text{Mo}$
Nehrenberg	1946 (3.16)	$M_s (^{\circ}\text{F}) = 930 - 540\text{C} - 60\text{Mn} - 40\text{Cr} - 30\text{Ni} - 20\text{Si} - 20\text{Mo}$
Steven and Haynes	1956 (3.17)	$M_s (^{\circ}\text{C}) = 561 - 474\text{C} - 33\text{Mn} - 17\text{Cr} - 17\text{Ni} - 21\text{Mo}$
Andrews (linear)	1965 (3.18)	$M_s (^{\circ}\text{C}) = 539 - 423\text{C} - 30.4\text{Mn} - 12.1\text{Cr} - 17.7\text{Ni} - 7.5\text{Mo}$
Andrews (product)	1965 (3.18)	$M_s (^{\circ}\text{C}) = 512 - 453\text{C} - 16.9\text{Ni} + 15\text{Cr} - 9.5\text{Mo} + 217(\text{C})^2 - 71.5(\text{C})(\text{Mn}) - 67.6(\text{C})(\text{Cr})$

Martensiitin muodostuminen loppuu lämpötilassa M_f , joka on niin ikään riippuvainen käytetyistä seosaineista ja etenkin teräksen hiilipitoisuudesta.

Martensiitin kiderakenne on tilakeskeinen tetragoninen toisin kuin austeniitin, jonka kiderakenne on pintakeskeinen kuutiollinen. Martensiitin kiderakenne on seurausta nopeasta jäähtymisestä, jolloin hiiliatomit eivät ehdi diffundoitumaan vaan jäävät tilakeskeisen kuutiollisen kiteen oktaedrikoloihin /15/. Tällöin tilakeskeisen kuutiollisen kiteen hiililiukoisuus ylittyy ja kiteestä tulee tilakeskeinen tetragoninen. Tetragonisessa kiteessä yhden sivun pituus on suurempi kuin kahden muun. Ero kasvaa martensiitin hiilipitoisuuden noustessa kuvan 4 mukaisesti.

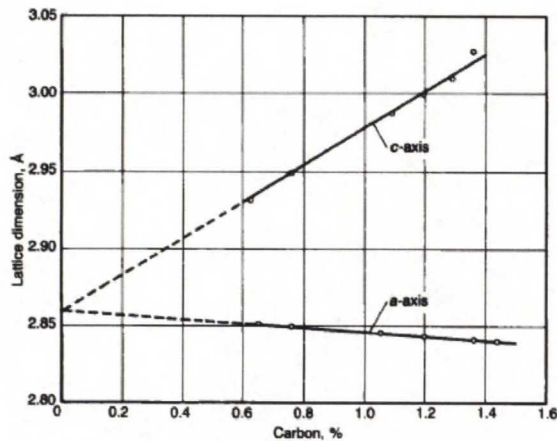
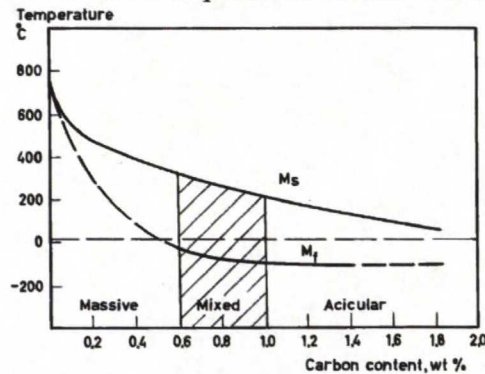


Fig. 3.2 Change in c and a parameters of martensite with carbon content in iron-carbon alloys. (Ref 3.47)

Kuva 4 Martensiitin tilakeskeisen tetragonisen kiteen a - ja c -akselien pituus hiilipitoisuuden funktiona /6/

Martensiittia on olemassa kaksi päätyyppiä levy- ja sälemartensiitti. Se muodostuu levy- vai sälemartensiittia tai niiden sekoitusta riippuu teräksen hiilipitoisuudesta ja martensiitin muodostumisen alkamislämpötilasta kuvan 5 mukaisesti. /16/



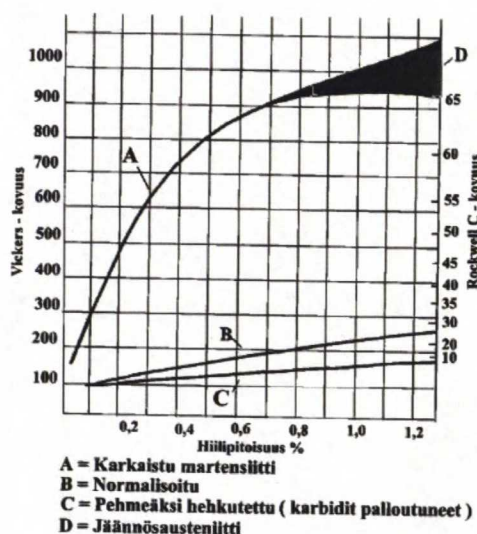
Kuva 5 Teräksen hiilipitoisuuden vaikutus syntyvän martensiitin tyyppiin /16/

2.4 Karkaisussa saatavat materiaaliominaisuudet

Karkaistut kappaleet ovat kovia, mutta myös hauraita. Karkaistujen kappaleiden sitkeyttä parannetaan päästämällä ne lämpötiloissa noin 180...600 °C. Päästön yhteydessä kovuus kuitenkin alenee, joten on tehtävä kompromissi haluttavan sitkeys- ja kovuustason välillä. Seuraavaksi tarkastellaan karkaistun kappaleen kovuuteen ja sitkeyteen vaikuttavia tekijöitä.

2.4.1 Kovuus

Karkaistun kappaleen kovuus riippuu karkaisussa muodostuneen martensiitin määrästä, johon vaikuttaa oleellisesti teräksen karkenevuus. Martensiitti on kova faasi ja sen kovuus riippuu lähes yksinomaan teräksen hiilipitoisuudesta. Karkaisussa martensiitin lisäksi mikrorakenteeseen jää lähes aina jäännösausteniittia. Suurin merkitys jäännösausteniitilla on korkeahiilisten terästen kovuuteen, joiden hiilipitoisuus on yli 0,7 %. Rakenteeseen jäävä jäännösausteniitti alentaa karkaistun teräksen kovuutta, mutta toisaalta se lieventää karkaisun yhteydessä tapahtuvia mittamuutoksia pienemmän ominaistilavuutensa ansiosta. /6/ Kuvassa 6 on esitetty karkaistun teräksen kovuus hiilipitoisuuden funktiona.



Kuva 6 Karkaistun teräksen kovuus hiilipitoisuuden funktiona (käyrä A) /5/

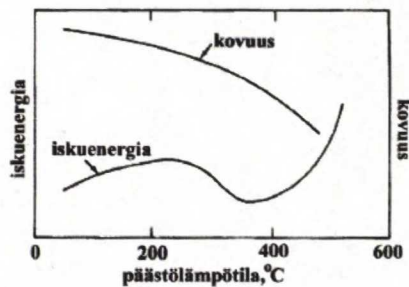
Martensiitin kovuus on seurausta hiiliatomien lukkiutumisesta oktaedrikoloihin martensiitin muodostuessa. Lukkiutuneet hiiliatomit vääristävät hilaa. Hilan ollessa vääristynyt, dislokaatioiden liike ja materiaalin muokkautuminen vaikeutuvat eli materiaali lujittuu. /6/

Karkaistun kappaleen kovuus on yleisesti pinnassa suurempi kuin kappaleen keskustassa. Syynä tähän on pinnan sisustaa suurempi martensiittipitoisuus. Kappaleen pinnan jäähtymisnopeus on niin suuri, että martensiittia muodostuu paljon. Keskustassa kappaleen jäähtymisnopeus ei puolestaan enää riitä estämään muiden faasien muodostumista, jolloin kovuus jää alhaisemmaksi. /6/

Päästössä karkaistun kappaleen kovuus laskee /6/. Seosaineilla, jotka ovat voimakkaita karbidien muodostajia, voidaan kovuuden laskua kuitenkin hidastaa. Ne aiheuttavat korkeissa päästölämpötiloissa myös niin sanotun sekundäärikarkenemisen.

2.4.2 Sitkeys

Martensiitin sitkeyttä parannetaan päästämällä se karkaisun jälkeen. Samalla kappaleen lujuus ja kovuus kuitenkin laskevat. Martensiitille luontaiseen haurauteen vaikuttavat useat tekijät, kuten hiiliatomien aiheuttamat hilan vääristymät, epäpuhtausatomien erkautuminen austeniitin raerajoille sekä karbidien ja jäännösjännitysten muodostuminen karkaisun yhteydessä /17/. Käytettävää päästölämpötilaa valittaessa tulee tehdä kompromissi haluttavan lujuustason sekä sitkeyden välillä. Käytettävän päästölämpötilan vallinnassa täytyy lisäksi ottaa huomioon päästöhaurautslämpötilat, joissa teräksen sitkeys laskee huomattavasti. Ylempi päästöhaurautslämpötila esiintyy lämpötilavälillä 450...600 °C ja alempi päästöhaurautslämpötila lämpötilavälillä 300...400 °C /5/. Päästöhaurautuden syynä on austeniittialueella tapahtuva epäpuhtausatomien suotautuminen raerajoille /5/. Kuvassa 7 on esitetty päästölämpötilan vaikutus teräksen kovuuteen ja iskusitkeyteen.



Kuva 7 Päästölämpötilan vaikutus teräksen kovuuteen ja iskusitkeyteen /5/

Sitkeyttä voidaan parantaa myös seostuksella, jolla saadaan aikaan hienorakeinen teräs. Niobi ja vanadiini muodostavat stabiileja karbideja, jotka austenitointilämpötilassa estävät rakeenkasvun. Austenitointilämpötila vaikuttaa myös sitkeyteen. Liian korkea austenitointilämpötila ja liian pitkä austenitointiaika aiheuttavat raekoon kasvun. Suuri raekoko alentaa sitkeyttä. /5/

Austeniitin rakeenkasvu riippuu austenitointiajasta ja -lämpötilasta kaavojen

$$d = d_0 e^{-Q/RT} \quad (2)$$

ja

$$d = kt^n \quad (3)$$

mukaisesti /18/.

Kaavoissa d = keskimääräinen raekoko

d_0 , k sekä n ovat vakioita

Q = aktivaatioenergia

R = yleinen kaasuvakio

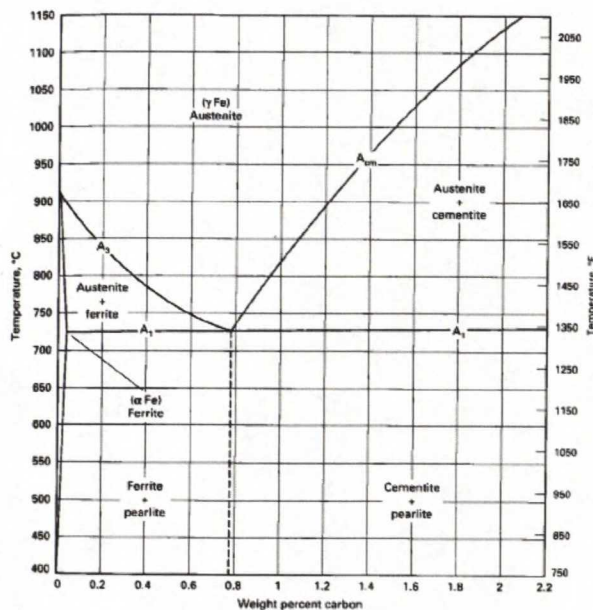
T = hehkutuslämpötila

t = hehkutusaika

Kaavoista on havaittavissa rakeenkasvun lämpötilariippuvuuden olevan eksponentiaalinen, kun taas aikariippuvuus on logaritminen. Tästä voidaan päätellä austeniitin rakeenkasvun ja siten teräksen haurastumisen olevan pääasiassa riippuvainen austenitointilämpötilasta eikä niinkään ajasta.

2.5 Austenitointi

Austenitointihehkutuksen tarkoituksena on saada teräksen rakenne austeniittiseksi. Alieutektoidisilla teräksillä (hiilipitoisuus alle 0,77 % /14/) hehkutus tapahtuu rauta-hiili tasapainopiirroksen A_3 -lämpötilan yläpuolella austeniittialueella ja ylieutektoidisilla teräksillä (hiilipitoisuus yli 0,77 % /14/) yleensä austeniitti-sementiitti alueella A_1 -lämpötilan yläpuolella ja A_{cm} -lämpötilan alapuolella. Kun ylieutektoidinen teräs austenitoidaan tällä alueella, jää osa karbideista liukenematta, minkä seurauksena lopullisessa rakenteessa on martensiitin lisäksi karbideja. Alieutektoidisilla teräksillä austenitointilämpötila on yleensä 50 °C A_3 -lämpötilan yläpuolella ja ylieutektoidisilla teräksillä 50 °C A_1 -lämpötilan yläpuolella /14/. Kuvassa 8 on nähtävissä rauta-hiili tasapainopiirros.



Kuva 8 Rauta-hiili tasapainopiirros /14/

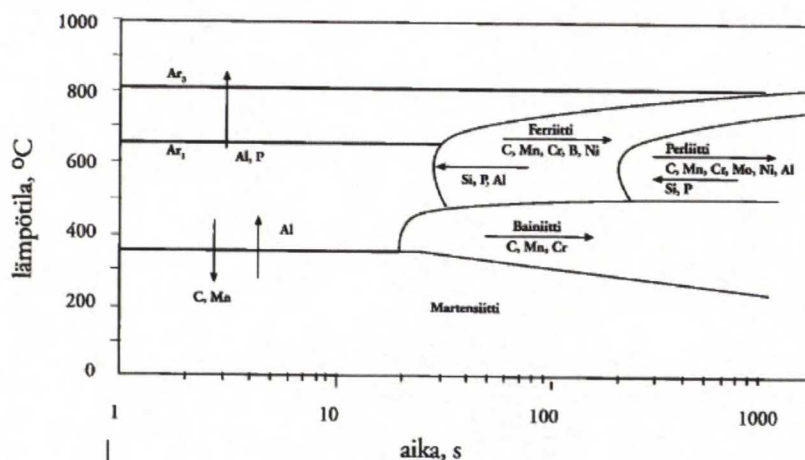
Austenitointilämpötilan valintaan vaikuttavat teräksen kemiallinen koostumus, kappaleelle tavoiteltavat ominaisuudet sekä kappaleen koko ja muoto /5/. Austenitointilämpötilan ollessa liian korkea, austeniitin raekoko kasvaa suureksi, jolloin martensiitista tulee entistä hauraampaa. Ylieutektoidisilla teräksillä korkea austenitointilämpötila johtaa myös liian suuren jäännösausteniittipitoisuuteen. Austenitointilämpötila ei saa myöskään olla liian matala, koska silloin teräksen kovuus jää matalaksi joko liian huonon karkenevuuden tai rakenteeseen austenitoinnissa jääneen ferriitin takia.

Kappaleen kuumennusnopeus austenitointilämpötilaan vaikuttaa myös karkaisun lopputulokseen. Kuumennuksen tapahtuessa liian nopeasti, saattaa kappale murtua tai siinä saattaa tapahtua suuria muodonmuutoksia /5/. Nopeaa kuumennusta tulee välttää etenkin silloin, kun kuumennettavassa kappaleessa on suuria ainepaksuuseroja. Kappaleen esilämmityksellä voidaan ehkäistä näitä kappaleen kuumenemisen yhteydessä mahdollisesti tapahtuvia ongelmia.

Kappaleen austenitointiin tarvittava aika riippuu teräksen seostuksesta, lähtörakenteesta sekä kappaleen koosta. Austenitointiaika jaetaan kahteen osaan, jotka ovat kuumennus- ja pitoaika. Pitoajan täytyy olla riittävän pitkä austeniitin muodostumiseksi ja rakenteen homogenisoimiseksi. /5/

2.6 Sammutus

Sammutukseksi kutsutaan teräksen nopeaa jäähdytystä austenitointilämpötilasta. Karkaisussa sammutuksen tulisi olla niin nopeaa, että vältetään austeniitin hajaantumiselta ferriitiksi, perliitiksi tai bainiitiksi ja saavutetaan martensiittinen rakenne. Martensiitin muodostumiseksi tarvittava jäähtymisnopeus riippuu teräksen seostuksesta /14/. Seostamattomien terästen karkaisu edellyttää erittäin nopeaa jäähdytystä. Nopea jäähdytys saadaan aikaan vedellä tai vesiliuoksilla. Seosteräkset voidaan puolestaan sammuttaa öljyyn, kaasuun tai ilmaan. Syynä seostettujen ja seostamattomien terästen erilaisiin sammutusväliainevaatimuksiin on siinä, että seosaineet hidastavat austeniitin hajaantumista ja siirtävät S-käyriä oikealle päin ja siten pidempiin aikoihin /5/. Kuvassa 9 on nähtävissä eri seosaineiden vaikutus S-käyriin niin martensiitin muodostumislämpötilojen kuin ferriitin, perliitin ja bainiitin alkamista kuvaavien käyrienkin osalta.

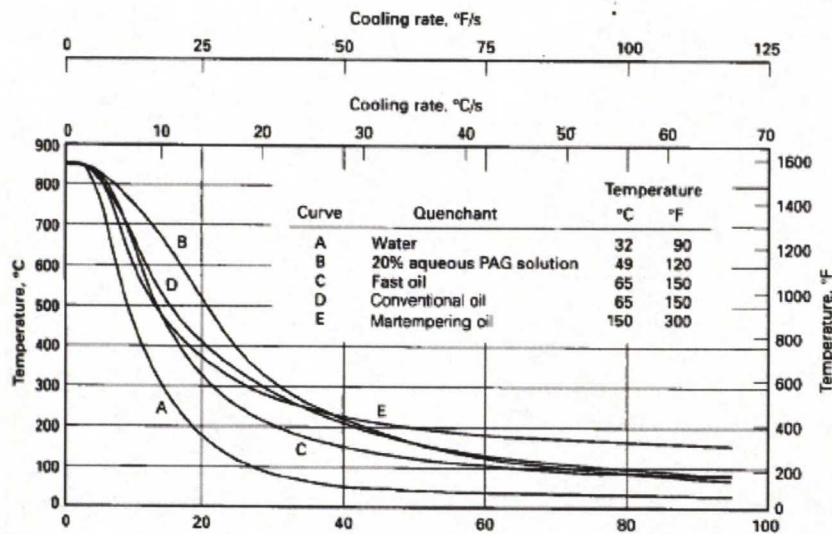


Kuva 9 Seosaineiden vaikutus S-käyriin /5/

Perinteisesti on valittu hitain mahdollinen jäähtymisnopeus suurien haitallisten jäännösjännitysten, mitta- ja muodonmuutosten sekä halkeiluriskin ehkäisemiseksi. Tämän takia on kehitetty seostettuja teräksiä, joilla saadaan aikaan martensiittinen rakenne hitaassakin jäähtyksessä, sekä sammutusväliaineita, joilla kappaleen jäähtyminen on tasainen ja hidas. Etenkin nopeaa jäähtymistä martensiitin muodostumisalueella on pidetty haitallisena sammutushalkeilun ja muodonmuutosten kannalta. On ollut kuitenkin jo kauan tiedossa, että yksinkertaiset hiiliteräksestä valmistetut kappaleet voidaan sammuttaa intensiivisesti ilman halkeilua. On olemassa myös tutkimustuloksia /4, 17, 19/, joiden mukaan tarpeeksi nopea jäähtyminen vähentää halkeiluriskiä ja suuria mitta- ja muodonmuutoksia sekä saa aikaan kappaleen pintaan suuren puristusjäännösjännitystilan, jolla on taas edullinen vaikutus kappaleen mekaanisiin ominaisuuksiin. Tätä niin kutsutun intensiivisen sammutuksen menetelmää tarkastellaan myöhemmin. Lähteessä /20/ on väitetty, että jopa 99 % kaikista karkaisuista olisi mahdollista suorittaa veteen, kunhan karkaisulaitteisto vain suunniteltaisiin oikein.

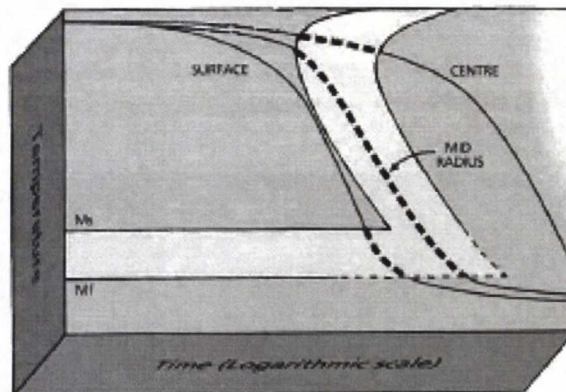
2.7 Sammutusväliaineet

Karkaisussa käytetään lukuisia sammutusväliaineita, joilla on erilaiset jäähtytysnopeudet. Sammutusväliaineita ovat muun muassa suolavesi ja vesi, polymeeriliuokset, öljyt, suolat sekä kaasut. Edellä mainituista väliaineista suolavesi on tehokkain ja kaasu hitain sammuttaja. Kuvasta 10 on nähtävissä joidenkin sammutusväliaineiden jäähtymiskäyrät.



Kuva 10 Eri sammutusväliaineiden jäähtymiskäyriä /14/

Tietystä teräksestä valmistetun kappaleen jäähtymisnopeus riippuu kappaleen koosta ja sen pinnanlaadusta, sammutusväliaineen ominaisuuksista, lämmönsiirrosta kappaleen ja sammutusväliaineen välillä sekä sammutusväliaineen määrästä ja virtausnopeudesta /21/. Sammutusta suunniteltaessa on otettava huomioon jäähtymisnopeuden vaihtelut kappaleen eri osissa. Vaikka kappaleen pinnalla ylitettäisiinkin martensiitin muodostumiseksi vaadittava kriittinen jäähtymisnopeus, ei se tarkoita kyseisen jäähtymisnopeuden saavuttamista kappaleen keskustassa, kuva 11.



Kuva 11 Kappaleen pinnan, keskustan ja säteen puolivälin jäähtyminen sammutuksessa /21/

Karkaisuöljyt ovat teollisessa karkaisussa tavallisimmin käytettyjä sammutusväliaineita. Syynä tähän on niiden tarjoama sopiva kompromissi jäähdytysnopeuden sekä halkeilu- ja muodonmuutosriskin välillä. Karkaisuöljyt aiheuttavat kuitenkin ympäristöongelmia, kuten sammutuksen yhteydessä ilmaan nousevat savut, öljyjäämät pesussa sekä pesuainepäästöt. Öljyn puhdistaminen ja oikeaoppinen hävittäminen lisää kustannuksia. Öljyä käytettäessä on myös aina olemassa tulipalovaara. Edellä mainittujen ongelmien

takia pyritäänkin kehittämään vaihtoehtoisia, ympäristöystävällisiä sekä turvallisia sammutusmenetelmiä, joilla kuitenkin olisi mahdollista saada aikaan öljyä vastaavat jäähtymisnopeudet. Yksi syy siihen miksi öljyjen jäähdytystehoon ollaan tyytyväisiä, on siinä, että öljykarkaisuun on jo olemassa sopivat teräslaadut, joilla saadaan aikaan hyvät mekaaniset ominaisuudet ilman halkeilua tai liian suuria mitta- ja muodonmuutoksia. /22/

Seuraavaksi käydään läpi karkaisuöljyt, vesi ja vesiliuokset sekä kaasut. Muita sammutusväliaineita ja -tekniikoita, kuten leijupatjoja, suola- ja metallikylypyjä sekä erilaisia puristimia, ei tässä yhteydessä tarkastella. Niistä on tietoa viitteissä /23, 24/.

2.7.1 Karkaisuöljyt

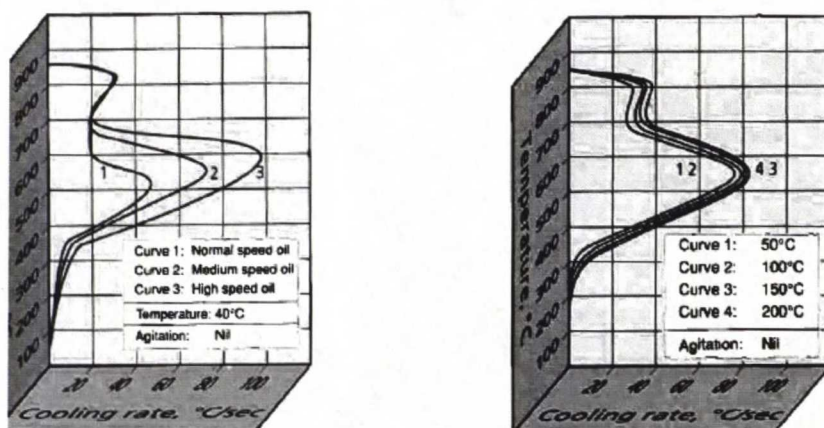
Ei tiedetä tarkkaan kuinka kauan öljyä on käytetty sammutusväliaineena rautaseosten karkaisussa. Ennen raakaöljyn löytämistä, karkaisussa käytettiin muita öljyjä, kuten kasvis-, kala- ja eläinöljyjä, joiden ominaisuudet uutena olivat hyvät, mutta ne vanhenivat nopeasti /23/. Ensimmäinen raakaöljyyn perustuva karkaisuöljy kehitettiin vuoden 1880 aikoihin /12/. Tämän jälkeen karkaisuöljyjä on kehitetty useita laatuja erilaisiin käyttötarkoituksiin.

Öljyjen sammutusteho on huomattavasti pienempi kuin puhtaan veden tai vesiliuosten, etenkin martensiitin muodostumisalueella. Syynä tähän on öljyjen suuri viskositeetti. Karkaisuöljyiltä vaaditaan korkeaa leimahduspistettä sekä syttymislämpötilaa. Muita vaatimuksia ovat hapettumisenkestävyys, vähäinen sakan muodostuminen, kappaleiden puhtaana säilyminen sekä sopiva jäähtymisnopeus. Sammutustehoon voidaan vaikuttaa huomattavasti koostumusta ja sekoitusnopeutta muuttamalla. Öljyjen paloherkkyyttä lisää öljyyn joutunut vesi jo pieninä pitoisuuksina höyrystymisen ja vaahtoamisen takia. Öljyissä käytettäviä lisäaineita ovat hapettumisenestoaineet, pesuaineet, sakkautumisen estoaineet, vaahtoamisen estoaineet ja emulgointiaineet pesun helpottamiseksi sekä jäähdytysominaisuuksiin vaikuttavat aineet. /21, 23/

Karkaisuöljyt voidaan luokitella usealla tavalla, kuten esimerkiksi jäähdytysnopeuden tai käyttölämpötilan perusteella. Nopeuden perusteella karkaisuöljyt jaetaan hitaisiin ja nopeisiin öljyihin. Hitaiden öljyjen jäähdytysnopeudet ovat suhteellisen alhaiset, minkä takia niitä käytetään runsaasti seostettujen terästen sekä työkaluterästen karkaisuun. Näillä teräksillä on hyvä karkenevuus, jolloin riittävät mekaaniset ominaisuudet saavutetaan hitaallakin jäähdytyksellä. Nopeita öljyjä käytetään puolestaan matalaan karkeneville teräslaaduille. Hiiletetyt ja typetetyt komponentit sekä paksut kappaleet, jotka on valmistettu karkenevuudeltaan keskitasoa olevista teräslaaduista, sammutetaan myös nopeisiin öljyihin. On myös olemassa öljyjä, joiden jäähdytysnopeudet ovat nopean ja hitaan öljyalaadun välistä, kuten kuvasta 6 ilmenee. /21/

Jako hitaisiin ja nopeisiin öljyihin perustuu lähinnä kappaleen jäähtymisnopeuteen lämpötilan 600 °C ympärillä, kuva 12. Jäähtymisnopeus kyseisessä lämpötilassa on

merkittävä kuitenkin vain suhteellisen huonosti karkenevien terästen kannalta. Esimerkiksi 34CrNiMo6 -teräksellä jäähtymisnopeus lämpötilan 400 °C tuntumassa on merkittävämpi. Sillä onko öljy edellä mainitun määritelmän mukaan nopeaa vai hidasta, ei ole suurtakaan merkitystä tämän teräslaadun karkenevuuteen.



Kuva 12 Vasemmalla nopean, hitaan ja keskinopean öljyn jäähtymisnopeuskäyrät, oikealla öljyn lämpötilan vaikutus kappaleen jäähtymisnopeuteen /21/

Karkaisuöljyn käyttölämpötila vaikuttaa öljyn käyttöikään, jäähdytysnopeuteen, öljyn viskositeettiin sekä karkaistavaan kappaleeseen tuleviin mitta- ja muodonmuutoksiin /21/. Kuvan 12 oikeanpuoleisessa kuvassa on havainnollistettu öljyn lämpötilan vaikutus kappaleen jäähtymisnopeuteen.

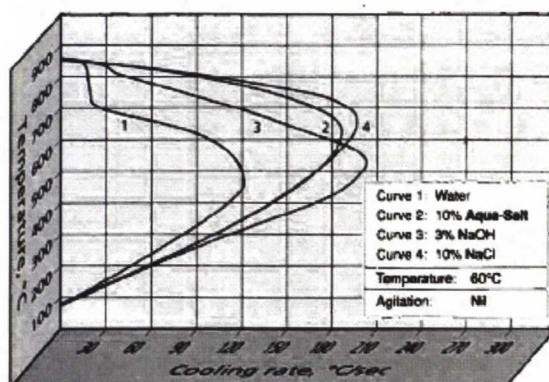
Käyttölämpötilan perusteella karkaisuöljyt jaetaan kylmiin ja kuumiin öljyihin. Kylmiä karkaisuöljyjä voidaan käyttää lämpötilaan 80 °C asti kohteissa, joissa kappaleessa tapahtuvat mitta- ja muodonmuutokset eivät ole riskitekijä. Kuumat karkaisuöljyt on suunniteltu käytettäväksi edellistä huomattavasti korkeimmissa lämpötiloissa kappaleen vääntymisen ehkäisemiseksi. Kuumien öljyjen käyttölämpötila ulottuu aina lämpötilaan 200 °C asti. /21/

2.7.2 Vesi ja vesiliuokset

Puhdas vesi on ympäristöystävällinen ja terveydelle vaaraton. Se on myös hinnaltaan edullinen. Sen jäähdytysnopeus on kuitenkin erittäin suuri lämpötilassa 300 °C, joka on useilla teräslaaduilla martensiitin muodostumisen alkamislämpötila /16/. Tämä aiheuttaa monissa tapauksissa niin suuren halkeilu- ja muodonmuutosriskin, ettei puhdas vesi sovellu käytettäväksi sammutusväliaineena tavanomaisessa allassammutuksessa.

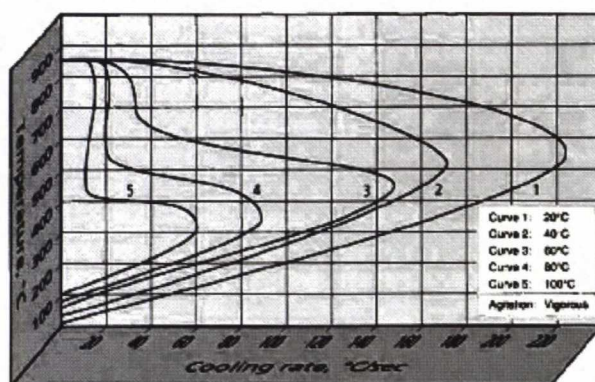
Puhtaan veden jäähdytystehoa voidaan lisätä ja samalla nostaa suurimman jäähdytysnopeuden lämpötila 500 °C lisäämällä siihen noin 10 % tavallista suolaa eli natriumkloridia tai soodaa eli natriumkarbonaattia /16/. Lipeää eli natriumhydroksidia käytetään myös. Kuvassa 13 on verrattu veteen lisättyjen aineiden vaikutusta kappaleen

jäähtymisnopeuteen. Natriumkloridin aiheuttamalta korroosiolta ja natriumhydroksidin myrkyllisyyden aiheuttamalta ongelmalta voidaan välttyä käyttämällä patentoituja yhdisteitä, kuten Aqua-salt:ia. /21/



Kuva 13 Veden lisäaineiden vaikutus kappaleen jäähtymisnopeuteen /21/

Toinen tapa vähentää veden aiheuttamaa halkeiluriskiä ja muodonmuutoksia on hidastaa sen jäähdysteho nostamalla lämpötilaa. Huonona puolena veden lämpötilan nostamisessa on jäähdytyksen höyrykalvovaiheen piteneminen, jonka seurauksena kappaleen kovuus saattaa jäädä paikoin matalaksi. Veden lämpötilan noustessa jäähdytyskyky hidastuu kuitenkin merkittävästi vain korkeissa lämpötiloissa eikä niinkään martensiitin muodostumisalueella /22/. Karkenemisen kannalta parhaat tulokset vedellä saadaan käyttämällä lämpötilaväliä 20...40 °C /16/. Kuvassa 14 on vertailtu veden lämpötilan vaikutusta kappaleen jäähtymisnopeuksiin.



Kuva 14 Veden lämpötilan vaikutus kappaleen jäähtymisnopeuteen /21/

Veteen voidaan lisätä myös erilaisia orgaanisia polymeerejä, joilla voidaan muuttaa veden sammutustehoa laajalti. Polymeerejä käyttämällä veden sammutusominaisuudet saadaan muutettua öljyn kaltaisiksi, mutta vältetään öljyjen haitallisilta ominaisuuksilta kuten kappaleiden likaantumiselta, palovaaralta, savuamiselta sekä ympäristöhaitoilta. Polymeeriliuoksissa sammutettavan kappaleen ympärille kehittyy muovikalvo, joka vaikuttaa sammutusprosessiin ja jäähdystehoon. Polymeerien jäähdytysnopeus asettuu pääasiassa puhtaan veden ja öljyn väliin joten ne soveltuvatkin sekä seostettujen että seostamattomien teräslaatujen karkaisuun. /22, 25/

Sammutukseen käytettäviä polymeereja on useita. Polymeerien tyypin lisäksi polymeeriliuosten jäähdystystehoon vaikuttavat polymeerien pitoisuus, kylvyn lämpötila sekä käytettävä sekoitus. Polymeereistä voi lukea lisää muun muassa lähteestä /25/.

2.7.3 Kaasut

Perinteisin ja yksinkertaisin kaasusammutus on karkaista runsaasti seostettu teräslaji seisovassa ilmassa. Kaasusammutuksella tarkoitetaan kuitenkin varta vasten kehitettyjä menetelmiä, joissa käytetään tiettyjä kaasuja, kaasunpaineita, kaasunvirtauksia ja joiden sammutusnopeutta voidaan säätää. Kaasusammutus soveltuu nykyään myös niukkaseosteisten hiiletys- ja nuorrutusterästen sammutukseen. Tällöin käytetään laitteistoja, joissa kaasun paine on korkea ja virtausnopeus suuri. /12, 14, 23/

Kaasujen sammutusominaisuudet vaihtelevat käytettävän kaasuseoksen, kaasun paineen sekä virtausnopeuden mukaan. Vety olisi tehokkain vaihtoehto sammutusväliaineeksi. Se on kuitenkin räjähdysvaarallinen, minkä takia sen käyttö ei ole yleistynyt. Helium ja typpi ovat kaasuja, joita käytetään yleisesti sammutukseen. Typeä käytetään sen edullisuuden takia ja se onkin yleisimmin käytetty kaasu. Heliumin käyttöä sammutuskaasuna puoltaa sen typeä parempi lämmönsiirtokyky ja pieni tiheys, joka mahdollistaa suuret virtausnopeudet. /12, 14, 23/

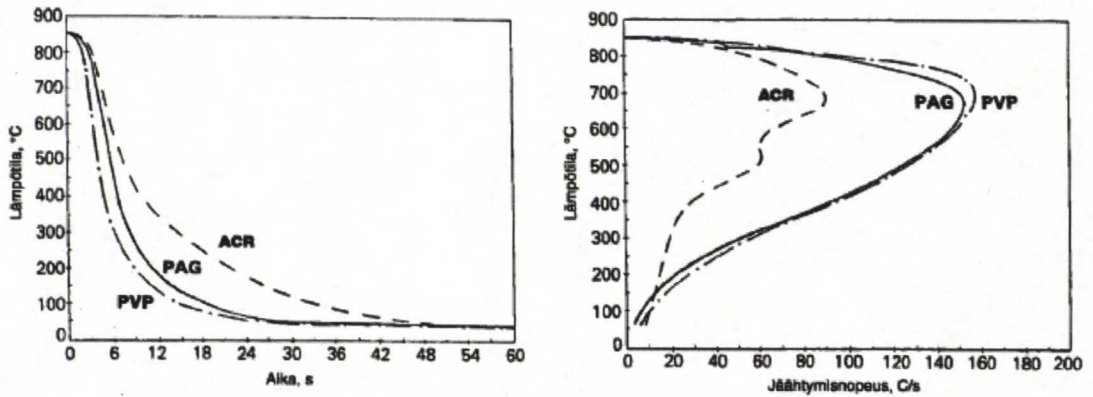
Kaasusammutuksen jäähdytysnopeuteen vaikuttaa sammutettavan kappaleen asento kaasuvirtaukseen nähden. Kohtisuoraan kaasuvirtaukseen nähden asetettujen kappaleiden on todettu jäähtyvän noin 60 prosenttia nopeammin kuin pitkittäin asetetut kappaleet /6/.

Kaasusammutuksella on omat etunsa verrattuna öljy- ja vesisammutuksiin, vaikka sillä ei päästäkään yhtä suuriin jäähtymisnopeuksiin. Kaasusammutuksen sammutusparametreja on helppo säädellä. Käytettäessä kaasusammutusta jäähtyminen on tasaista, minkä ansiosta kappaleeseen tulee pienemmät muodonmuutokset. Ympäristön kannalta kaasusammutus on myös hyvä vaihtoehto, koska päästöt ovat pienempiä kuin öljysammutuksessa. Lisäksi karkaistut tuotteet ovat puhtaita, jonka seurauksena työvaiheiden määrä vähenee. Tämän takia etenkin autoteollisuus käyttää runsaastiseostettuja, kaasusammutettavia teräslajeja. /12, 23/

2.8 Jäähtymiskäyrät

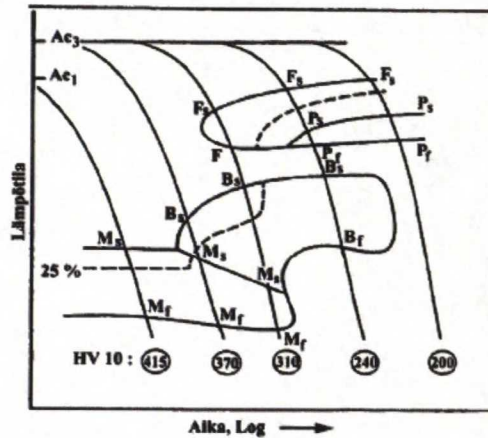
Jäähtymiskäyrien avulla voidaan arvioida sammutusväliaineen karkaisuominaisuuksia. Ne kuvaavat koekappaleen jäähtymistä karkaisulämpötilasta tutkittavassa sammutusväliaineessa. Jäähtymiskäyriin lasketaan kuuluviksi varsinainen jäähtymiskäyrä, jossa on sammutettavan kappaleen lämpötila ajan funktiona, sekä tästä derivoitu jäähtymisnopeuskäyrä, jossa on koekappaleen lämpötila jäähtymisnopeuden

funktiona. Kuvassa 15 vasemmalla on esitetty eri polymeerien lämpötila ajan funktiona ja oikealla puolestaan lämpötila jäähtymisnopeuden funktiona.



Kuva 15 Polymeeriliuosten jäähtymiskäyriä /23/

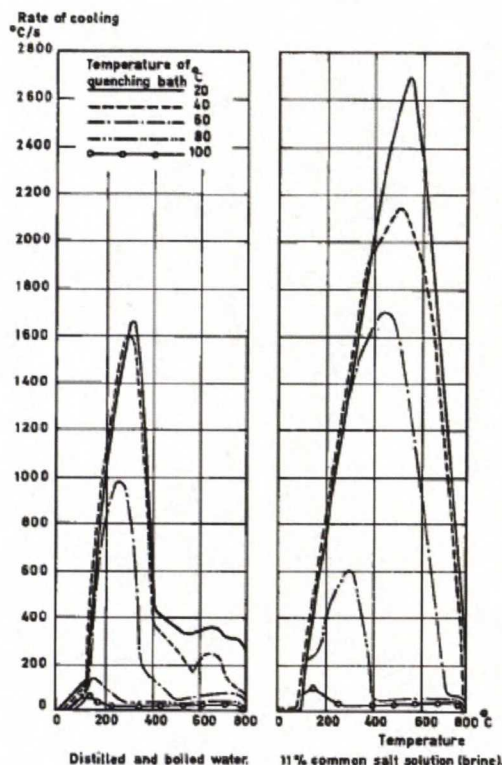
Jäähtymiskäyrästä etenkin jäähtymisnopeuskäyrästä on nähtävissä jäähtymisvaiheiden esiintymisalueet. Jos jäähtymiskäyriä osataan tulkita oikein, niistä voidaan arvioida lisäksi sammutusväliaineen karkaisukyky sekä sen aiheuttama muodonmuutos- ja halkeiluvaara. Jotta kyseinen tarkastelu olisi mahdollista, tarvitaan jäähtymiskäyrien lisäksi teräslaadun jatkuvan jäähtymisen käyrä, josta näkee faasimuutoslämpötilat sekä -nopeudet /23/. Kuvassa 16 on esimerkki jatkuvan jäähtymisen käyrästä.



Kuva 16 Malli jatkuvan jäähtymisen käyrästä /5/

Jäähtymiskäyrien määrittämiseksi on olemassa useita menetelmiä. Mittauksissa käytettävä anturi voi olla muodoltaan sylinteri tai pallo ja se on voitu valmistaa ruostumattomasta teräksestä, hopeasta tai nikkeliyhdisteestä. Kenties käytetyin ja laajimmin hyväksytty menetelmä perustuu standardin ISO 9950:1995 mukaiseen Inconel 600:sta valmistettuun halkaisijaltaan 12,5 mm olevaan sylinterinmalliseen mitta-anturiin /21/.

Testeillä saadut tulokset riippuvat mitta-anturissa käytetystä materiaalista sekä sen geometriasta ja pinnan laadusta /22. Kuvassa 17 on vasemmalla puolella halkaisijaltaan 20 mm olevan hopeakuulan jäähtymisnopeuskäyrät vedessä eri lämpötiloissa ja oikealla puolella suolavesiliuoksessa tehdyt mittaustulokset vastaavalle koekappaleelle. Verrattaessa vasemman puoleisen kuvan jäähtymiskäyriä aiemmin kuvassa 14 esitettyihin sylinterimäisellä Inconel 600 materiaalista valmistetulla mitta-anturilla saatuihin tuloksiin huomataan jäähtymisnopeuksien olevan huomattavasti suuremmat hopeakuulilla tehdyissä kokeissa. Tämä selittyy suurimmaksi osaksi hopean paremmalla lämmönjohtavuudella.



Kuva 17 Hopeakuulan jäähtymisnopeuskäyriä mitattuna vedessä ja suolaliuoksessa eri lämpötiloissa/16/

3 Karkaisussa tapahtuvat mitta- ja muodonmuutokset

Karkaisun yhteydessä tapahtuvat mitta- ja muodonmuutokset ovat haitallisia, joten niitä pyritään hallitsemaan tarkasti. Kappaleen mittojen ja muotojen muuttuessa, joudutaan karkaisun jälkeen suorittamaan ylimääräisiä työvaiheita kappaleen saamiseksi mittoihin kutakin käyttötarkoitusta varten. Mittoihin koneistus onnistuu erilaisilla työstömenetelmillä vaikka saattaakin olla ongelmallista kappaleen suuren kovuuden takia. Karkaisun jälkeinen koneistus lisää merkittävästi kappaleen valmistuskustannuksia. Muodonmuutosten kuten kappaleen vääntymien korjaaminen lämpökäsittelyn jälkeen on puolestaan huomattavasti ongelmallisempaa. Pahimmillaan muodonmuutosten poistaminen voi johtaa kappaleen murtumiseen.

Mitta- ja muodonmuutokset johtuvat sekä karkaisun kuumennuksen että sammutuksen aikana syntyvistä jännityksistä. Sammutuksessa syntyvien mitta- ja muodonmuutosten suuruus ja luonne riippuvat karkaistavan kappaleen koosta, muodosta ja koostumuksesta sekä käytettävästä sammutusväliaineesta. Ongelmia esiintyy etenkin pitkillä ja ohuilla kappaleilla; suurilla kappaleilla, joilla on ohut poikkileikkaus sekä kappaleilla, joissa on lovia, reikiä tai uurteita, koska ne on vaikea lämmittää ja jäähdyttää tasaisesti.

Teräksen koostumuksella on myös merkittävä vaikutus kappaleen muodonmuutosten syntyyn. Runsashiiliset ja suuren karkenevuuden omaavat teräkset ovat alttiimpia muodonmuutoksille kuin niukkahiiliset ja matalaan karkenevat teräkset. Samoin korkea austenitointilämpötila ja matala martensiitin muodostumisen alkamislämpötila edesauttavat mitta- ja muodonmuutosten syntyä.

Yleisen käsityksen mukaan nopea jäähtyminen martensiitin muodostumisalueella altistaa kappaleen muodonmuutoksille ja halkeilulle. N.I. Kobasko on kuitenkin todistanut tarpeeksi nopean jäähtymisen martensiitin muodostumisalueella vähentävän halkeiluriskiä ja kappaleen vääntymistä. Avainasemassa muodonmuutosten synnyn hallitsemisessa onkin tasainen lämmönsiirto koko kappaleen pinnalta ja kappaleen tasainen jäähtyminen /26/.

Seuraavaksi tarkastellaan mitta- ja muodonmuutosten aiheuttajia sammutuksessa.

3.1 Karkaisussa syntyvät jännitykset

Karkaisussa syntyvät jännitykset ovat lämpöjännityksiä sekä transformaatiojännityksiä /23/. Lämpöjännitykset johtuvat kappaleeseen muodostuvista lämpötilaeroista ja transformaatiojännitykset puolestaan faasimuutoksista.

3.1.1 Lämpöjännitykset

Jokaisella materiaalilla on tietty lämpölaajenemiskerroin, joka kuvastaa sitä, kuinka paljon lämpötilanvaihtelut muuttavat kappaleen mittoja. Lämpölaajenemiskertoimen avulla voidaan laskea kuinka paljon kappaleen mitat muuttuvat lämpötilan vaihdellessa kaavan /27/

$$\Delta x = Cx\Delta T \quad (4)$$

mukaisesti, jossa Δx = pituuden muutos
 x = alkuperäinen pituus
 ΔT = lämpötilan muutos
 C = materiaalin lämpölaajenemiskerroin

Karkaisun yhteydessä esiintyvät lämpötilan vaihtelut ovat erittäin suuria ja nopeita. Ensin kappale kuumennetaan austenitointilaan, minkä jälkeen se sammutetaan huoneenlämpötilaan. Lämmitettäessä terästä se laajenee ja jäädytettäessä se puolestaan kutistuu.

Sammutuksen alussa kappaleen ulkopinta jäähtyy nopeasti ja siten kutistuu sisustan ollessa edelleen kuuma. Tämän seurauksen kappaleen pintaan tulee vetojännitystilaa ja sisustaan puristusjännitystilaa aiheuttaen sisäistä plastista muodonmuutosta. Kappaleen keskustan edelleen jäähtyessä, keskusta saavuttaa tasaisen alhaisen lämpötilan ja kutistuu, jolloin jännitystilat vaihtuvat ja kappaleen pintaan tulee hyödyllinen puristusjäännösjännitystilaa. Sammutuksen ollessa erittäin raju ja nopea, kappaleessa tapahtuvat muodonmuutokset ovat suuria.

3.1.2 Transformaatiojännitykset

Karkaisun aikana teräskappaleessa tapahtuu useita faasitransformaatioita. Austenitointi- ja karkaisukäytännössä teräksen rakenne muuttuu yleensä ferriittis-perliittisestä rakenteesta täysin austeniittiseksi. Sammutuksessa austeniittinen rakenne pyritään saamaan martensiittiseksi ilman ferriitin, perliitin tai bainiitin muodostumista. Jokaisella edellä mainituista faaseista on olemassa oma ominaistilavuutensa, taulukko 3 /16/.

Taulukko 3 Teräksessä esiintyvien faasien ominaistilavuudet /16/

Phase or phase mixture	Range of carbon %	Calculated specific volume at 20 °C cm ³ /g
Austenite	0-2	$0.1212 + 0.0033 \cdot (\%C)$
Martensite	0-2	$0.1271 + 0.0025 \cdot (\%C)$
Ferrite	0-0.02	0.1271
Cementite	6.7 ± 0.2	0.130 ± 0.001
Epsilon carbide	8.5 ± 0.7	0.140 ± 0.002
Graphite	100	0.451
Ferrite + cementite	0-2	$0.1271 + 0.0005 \cdot (\%C)$
Low-carbon content martensite + epsilon carbide	0.25-2	$0.1277 + 0.0015 \cdot (\%C - 0.25)$
Ferrite + epsilon carbide	0-2	$0.1271 + 0.0015 \cdot (\%C)$

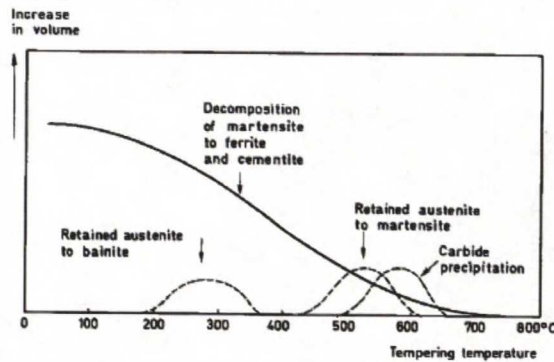
Transformaatiojännitysten syynä ovat nämä karkaisun aikana tapahtuvat ominaistilavuuden muutokset. Austeniittiin tai martensiittiin liunneen hiilen määrällä on suuri vaikutus faasin ominaistilavuuteen taulukko 4 /16/.

Taulukko 4 Tilavuuden muutokset faasitransformaatioiden seurauksena /16/

Transformation	Change in volume %
Spheroidized pearlite → austenite	$-4.64 + 2.21 \cdot (\%C)$
Austenite → martensite	$4.64 - 0.53 \cdot (\%C)$
Spheroidized pearlite → martensite	$1.68 \cdot (\%C)$
Austenite → lower bainite	$4.64 - 1.43 \cdot (\%C)$
Spheroidized pearlite → lower bainite	$0.78 \cdot (\%C)$
Austenite → upper bainite	$4.64 - 2.21 \cdot (\%C)$
Spheroidized pearlite → upper bainite	0

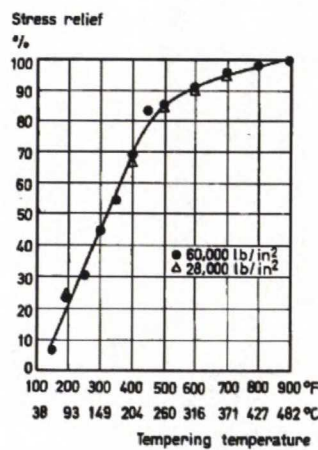
Sammutuksen kappaleen pinta muuttuu ensiksi martensiittiseksi ja laajenee, kun taas kappaleen keskusta kutistuu johtaen pinnan puristusjännitystilaan ja keskustan vetojännitystilaan.

Karkaisua seuraavassa päästössä tapahtuu myös muutoksia kappaleen rakenteessa ja jännitystilassa. Kuvassa 18 on esitetty skemaattisesti päästön yhteydessä tapahtuvat tilavuuden muutokset lämpötilan funktiona.



Kuva 18 Päästön yhteydessä tapahtuvat tilavuuden muutokset /16/

Kuvaajasta saa jonkinlaisen käsityksen siitä mitä päästön yhteydessä voi tapahtua. Varsinaiseen lopputulokseen vaikuttavat kuitenkin teräksessä olevat seosaineet ja niiden määrät. Päästö aiheuttaa muutoksia myös kappaleen jännitystilassa martensiitin hajaantuessa, jolloin jännitystilat laukeavat, kuva 19.



Kuva 19 Jännitysten laukeaminen päästön yhteydessä /16/

3.2 Sammutusolosuhteiden vaikutukset

Sammutusolosuhteet vaikuttavat mitta- ja muodonmuutosten syntyyn. Eniten vaikuttaa sammutusväliaineen sekoitus. Muita vaikuttavia tekijöitä ovat käytettävä

sammutusväliaine sekä se missä asennossa ja miten nopeasti kappale upotetaan sammutuskylpyyn.

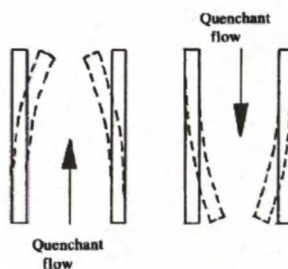
3.2.1 Sekoitus

Sammutusväliaineen sekoituksen avulla pidetään koko altaan lämpötila tasaisena, ehkäistään höyrykalvon muodostumista sekä siirretään lämpöä pois kappaleen pinnalta /21/. Tasaisella sekoituksella pystytään parantamaan sammutusväliaineen jäähdytyskykyä ja saadaan silti suoria kappaleita. Jos sekoitus ei ole tasaista tai riittävän nopeaa, sammutusväliaineen jäähdytyskyky huononee sekä vaihtelee kappaleen eri osissa, jolloin seurauksena on vääntyneitä kappaleita. Epätasainen sekoitus saa aikaan sen, että kappale jäähtyy nopeammin jostain paikasta ja toisesta taas hitaammin. Tämä johtaa kappaleiden vääntymiseen.

Sekoitusnopeutta muuttamalla voidaan vaikuttaa sammutusväliaineen tehokkuuteen. Sekoituksen voimakkuutta voidaan muuttaa esimerkiksi sekoittimien kierrosnopeutta säätämällä. Perinteisen ajattelutavan mukaan sekoituksen tulisi olla voimakkainta sammutuksen alussa, ennen martensiitin muodostumislämpötilaa, hidastamalla tämän jälkeen sekoitusnopeutta, on mahdollista saada hitaampi jäähtymisnopeus martensiitin muodostumisalueella, joka joissain tapauksissa auttaa ehkäisemään kappaleessa tapahtuvia muodonmuutoksia. /28/

Sekoituksen suunnalla on huomattava merkitys kappaleen jäähtymiseen, etenkin pitkillä kappaleilla. Pitkänomaisilla kappaleilla sivulta tuleva virtaus lisää jäähtymistä enemmän kuin pituussuuntainen virtaus. Pituussuuntainen virtaus saa kuitenkin aikaan tasaisemman jäähtymisen, jolloin voidaan välttyä suurilta muodonmuutoksilta. Tämän takia se onkin suositeltavaa. Pitkät kappaleet tuleekin panostaa pystyasentoon. Virtauksen pitäisi myös osua tasaisesti koko panokseen eikä esimerkiksi vain yhdelle sivulle. /23/

Kuvassa 20 on havainnollistettu mihin suuntaan pitkä kappale vääntyy sammutusväliaineen virtauksen seurauksena.



Kuva 20 Sammutusväliaineen virtauksen suunnan vaikutus pitkien kappaleiden vääntymiseen /29/

Sammutusväliaineen sekoitus on mahdollista toteuttaa pumpuilla tai erilaisilla sekoittimilla. Jos ei voida sekoittaa sammutusväliainetta, saman tuloksen saa aikaan kappaleen liikuttaminen /14/. Tämä soveltuu käytännössä vain pienille kappaleille. Jotta sekoitus saadaan tasaiseksi ja tarpeeksi voimakkaaksi, täytyy sammutusallas suunnitella huolella.

3.2.2 Sammutusväliaine

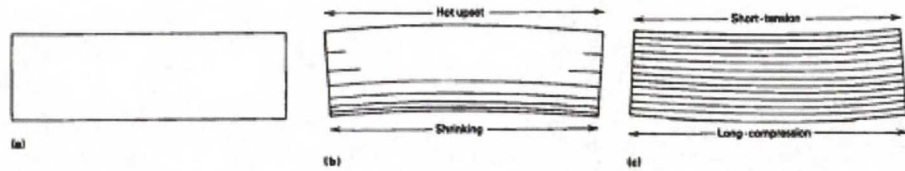
Kaikilla kiehuvilla nestemäisillä sammutusväliaineilla esiintyy kolme jäähtymisvaihetta, jotka ovat höyrykalvo-, kiehun ja konvektiovaihe. Näiden vaiheiden kesto ja niissä esiintyvä jäähtymisnopeus riippuu aina sammutusväliaineesta, mikä puolestaan vaikuttaa syntyviin mitta- ja muodonmuutoksiin.

Sammutusnesteen lämpötilalla on vaikutus sammutusvaiheisiin sekä mitta- ja muodonmuutosten syntyyn. Lämpötilan ollessa korkea, jäähtyminen tapahtuu hitaammin, jolloin kappaleeseen ei tule suuria lämpötilaeroja, jotka voisivat aiheuttaa mitta- ja muodonmuutoksia eriaikaisen martensiittitransformaation seurauksena.

Sammutusväliaineen kunnolla on myös merkitys mitta- ja muodonmuutosten syntyyn. Esimerkiksi, jos öljyyn sekoittuu 0,5 % vettä /23/, muuttuu kappaleen maksimijäähtymisnopeus sekä jäähtymisnopeus konvektiovaiheessa huomattavasti, jota pidetään kriittisimpänä jäähtymisvaiheena mitta- ja muodonmuutosten synnyn kannalta. Karkaisuöljyjen hapettuminen vähentää puolestaan höyrykalvovaiheen stabiilisuutta, jolloin jäähtymisnopeus kappaleen eri osissa vaihtelee aiheuttaen mitta- ja muodonmuutoksia.

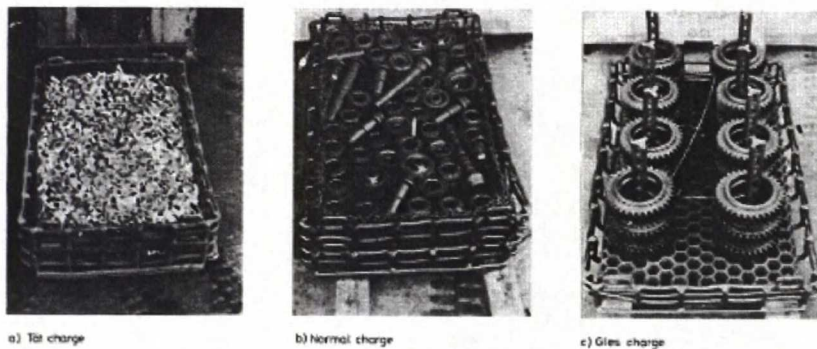
3.2.3 Kappaleiden panostus

Kun kappale upotetaan sammutuskylpyyn, sammutusnesteeseen ensimmäisenä osuva puoli jäähtyy aina ensin ja siten myös aiemmin kuin muut osat kappaleesta. Upotuksen ollessa liian hidas saattaa tästä seurata kappaleen epätasainen jäähtyminen ja vääntyminen. Sammutusväliaineeseen ensin osuva puoli, eli nopeammin jäähtyvä osa kappaleesta kutistuu ja lujittuu jäähtyessään, aiheuttaen plastista deformaatiota kappaleen kuumalle puolelle. Jäähdytyksen edetessä ja kappaleen lämpötilan tasaantuessa, hitaammin jäähtynyt puoli puolestaan kutistuu johtaen kyseisen pinnan vetojännitystilaan ja vastaavasti ensin jäähtyneen osan puristusjännitystilaan, kuva 21. /14/



Kuva 21 Epätasaisen jäähtymisen vaikutus kappaleessa tapahtuviin muodonmuutoksiin. Vasemmalla tasaisen kuuma kappale, keskellä alaosastaan jäähtynyt ja oikealla kokonaan jäähtynyt kappale. /14/

Panoksen tiheydellä on myös merkitys kappaleissa tapahtuviin mitta- ja muodonmuutoksiin. Pienet kappaleet voidaan panostaa tiheästi ja kappalekoon suurentuessa täytyy panostuksen harventua. /30/ Kuvassa 22 on esimerkkipanoksia erikokoisille kappaleille.



Kuva 22 Erikokoisten kappaleiden panostus /30/

Suuria kappaleita ei voida asettaa panokseen miten sattuu, koska on tärkeää saada tasainen sammutusväliaineen virtaus joka puolelle kappaletta ja siten tasainen jäähtymisnopeus. Pienet kappaleet jäähtyvät helpommin, joten niiden jäähtyminen saadaan tasaiseksi ilman tasaista sammutusväliaineen virtausta.

Panostus pitää tehdä siten, että sammutusnesteen virtaus kappaleisiin on mahdollisimman tasainen ja voimakas. Pitkät kappaleet tulee ripustaa pystyasentoon. Symmetriset kappaleet, kuten laakerirenkaat ja sylinterit, voidaan pinota päällekkäin. Ohuet kappaleet, kuten sahanterät ja kiekot, on paras tukea vaakasuorilla harvaanlovetuilla tangoilla. Pienet kappaleet voidaan panostaa sopivan harvasilmäisiin verkkokoreihin tai reikälevyille. Toisiaan lähellä olevat kappaleet aiheuttavat jäähtyessään lisävirtauksia, jolloin esimerkiksi höyrykalvovaihe voi olla oletettua lyhyempi. /23/

4 Lämmönsiirto sammutuksessa

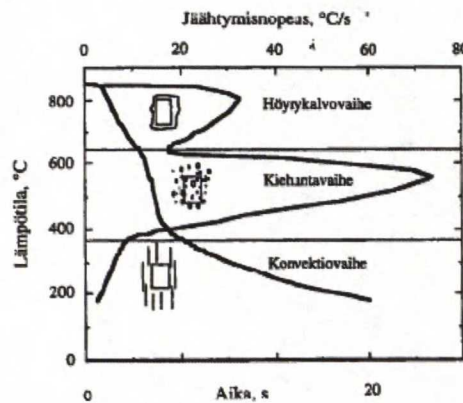
Sammutuksessa lämpö siirtyy kappaleesta sammutusväliaineeseen. Lämmönsiirron nopeutta kuvaa lämmönsiirtokerroin kappaleen pinnan ja sammutusväliaineen välillä.

Lämmönsiirtokertoimen vaihtelu kappaleen eri osissa on otettava huomioon sammutusprosessia suunniteltaessa. Sammutusväliaineen sekoituksella lämmönsiirtoa pyritään tasoittamaan.

Lämmönsiirto tapahtuu yleisesti johtumalla, säteilemällä ja konvektiolla. Johtumisessa lämpö siirtyy kiinteän aineen sisällä tai kahden kosketuksessa olevan aineen välillä kuumemmasta kylmempään. Säteilyssä kappale puolestaan säteilee lämpöä ympäristöönsä. Konvektiossa on mukana aina virtaava fluidi, joka kuljettaa mukanaan lämpöä. Lämmönsiirto fluidiin ja siitä pois tapahtuu pääosin johtumalla, mutta myös säteilemällä. /31/

4.1 Sammutuksen jäähtymisvaiheet

Sammutuksessa on yleisesti kolme jäähtymisvaihetta käytettäessä nestemäistä, höyrystyvää sammutusväliainetta. Jäähtymisvaiheet ovat järjestyksessään höyrykalvovaihe, kiehumisvaihe ja konvektiovaihe, kuva 23.



Kuva 23 Nestemäisissä sammutusväliaineissa esiintyvät jäähtymisvaiheet /23/

Eri vaiheiden esiintymislämpötilat ovat sammutusväliainekohtaisia. Itse sammutusväliaineen lisäksi jäähtymisen eri vaiheisiin vaikuttavat sammutusväliaineen lämpötila ja sekoitus.

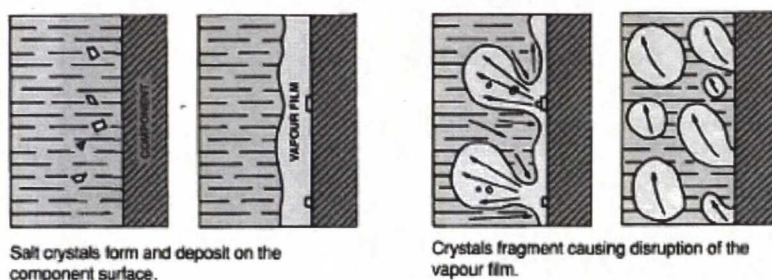
Yleensä kappaleessa esiintyvät nämä kolme jäähtymisvaihetta samanaikaisesti, koska siirtyminen vaiheesta toiseen tapahtuu eri nopeudella kappaleen eri osissa. Höyrykalvo murtuu esimerkiksi helpommin terävissä kulmissa kuin alas avautuvissa koloissa ja onkaloissa, joten kiehumisvaiheen alkamisajankohta vaihtelee kappaleen muotojen mukaan /23/. Seuraavaksi tarkastellaan näitä kolmea jäähtymisvaihetta yksitellen sekä sammutusväliaineen sekoituksen ja lämpötilan vaikutusta niihin. Jäähtymisvaiheisiin vaikuttavat myös esimerkiksi kappalekoko ja pinnan laatu.

4.1.1 Höyrykalvovaihe

Höyrykalvovaihe esiintyy välittömästi kappaleen sammutusväliaineeseen upottamisen jälkeen. Höyrykalvovaiheessa sammutettavan kappaleen pinnan lämpötila on niin korkea, että sammutusväliaine höyrystyy ja kappaleen ympärille muodostuu ohut höyrykalvo. Lämmönsiirto on suhteellisen hidasta höyrykalvovaiheen aikana, koska lämpö siirtyy säteilemällä ja johtumalla höyrykalvon läpi. Höyrykalvo toimii näin lämmöneristyskalvona. Höyrykalvovaiheen pituus voi vaihdella runsaasti eri sammutusväliaineiden välillä. Siihen vaikuttavat sammutusväliaineen lisäksi muun muassa sammutettavan kappaleen pinnanlaatu ja hapettumisaste sekä kappaleen ja panoksen tiheys. Kappaleen pinnalla olevat syvät naarmut nopeuttavat höyrykalvon sortumista kuten myös kappaleen pinnalla oleva oksidikerros. /23/

Höyrykalvovaihe lakkaa kappaleen ulkopinnan saavuttaessa Leidenfrost-lämpötilan eli lämpötilan, jossa höyrykalvovaihe muuttuu kiehumtavaiheeksi /9/. Höyrykalvovaiheen kestolla ja lämpötilalla, jossa maksimi jäähtymisnopeus esiintyy, on merkittävä vaikutus teräksen kykyyn kareta läpi.

Höyrykalvovaihetta ei esiinny käytettäessä vesipitoista sammutusväliainetta, jossa on yli 5 painoprosenttia ionista lisäainetta kuten kaliumkloridia, natriumhydroksidia tai rikkihappoa /9/. Tällöin sammutus alkaa suoraan kiehumtavaiheella. Suolavesiliuoksen höyrykalvovaihetta estävä vaikutus perustuu liuoksen sisältämiin negatiivisesti varautuneisiin ioneihin, jotka kerääntyvät liuokseen upotetun positiivisesti varautuneen kappaleen pinnalle /21/. Suolaionit yhdessä tarpeeksi nopean sammutusväliaineen virtauksen kanssa tuhoavat höyrykalvon kuvan 24 mukaisesti.



Kuva 24 Suolaionien höyrykalvoa tuhoava mekanismi /21/

Höyrykalvon murtuessa kappaleen pinta tulee suoraan kosketukseen sammutusväliaineen kanssa. Kyseinen prosessi, jossa höyrykalvo murtuu ja muodostuu uudelleen, tapahtuu useita kertoja toistuvina aaltoina sammutusnesteen Leidenfrost-lämpötilassa. Leidenfrost-lämpötila ei riipu sammutettavan kappaleen alkulämpötilasta. /9/

4.1.2 Kiehuntavaihe

Kiehuntavaihe alkaa kappaleen pinnan lämpötilan laskiessa niin alhaiseksi, ettei säteilylämpö pysty enää ylläpitämään yhtenäistä höyrykalvoa kappaleen ympärillä /9/. Lämpötilan edelleen laskiessa, osittainen höyrykalvo muuttuu lukuisiksi kupliksi ja sammutusväliaine pääsee suoraan kosketukseen kappaleen pinnan kanssa. Kuuman pinnan lähellä oleva neste ylikuumenee ja pyrkii höyrystymään sekä muodostamaan kuplia paikoissa, joissa on ydintymiskohtia kuten pieniä naarmuja tai kuoppia. Kuplat siirtävät mukanaan niihin sitoutunutta lämpöä sekä lisäävät konvektion tehokkuutta sekoittamalla kappaleen pinnan lähellä olevaa nestettä. Vaiheen aikana kappale on yhä erittäin kuuma ja sammutusväliaine kiehuu voimakkaasti. Lämmönsiirto on erittäin nopeaa pienillä lämpötilaeroilla. Kiehuntavaihe onkin nopein ja tehokkain lämmönsiirtovaiheista.

Kiehuntavaihe lakkaa kappaleen pinnan jäähtyessä sammutusväliaineen kiehumispisteen alapuolelle. Kyseinen lämpötila riippuu yksinomaan käytettävän sammutusväliaineen tyypistä. /9/

4.1.3 Konvektiovaihe

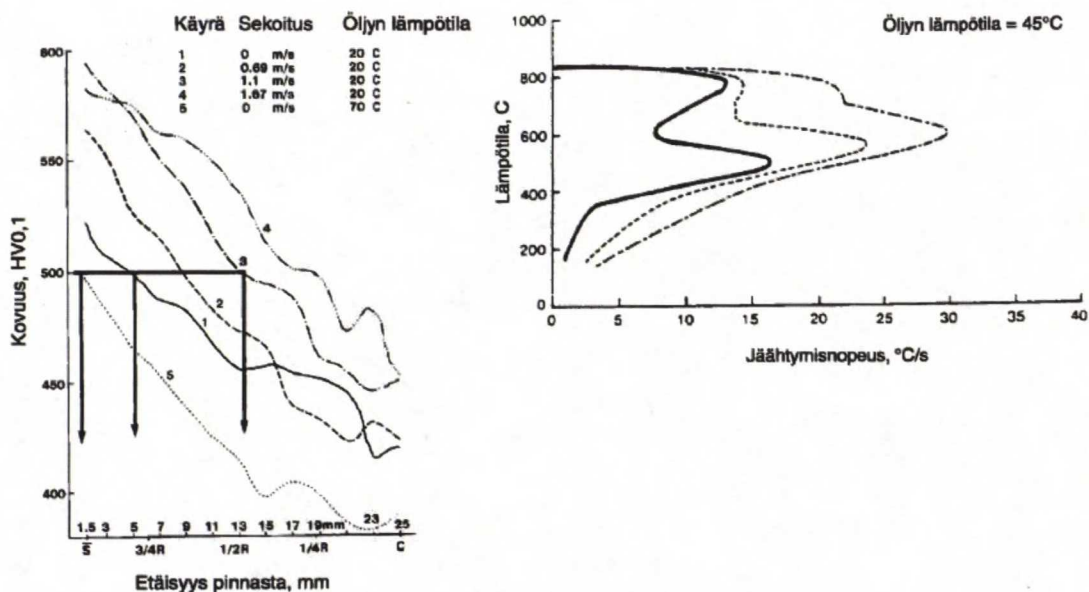
Konvektiovaihe alkaa kappaleen pinnan lämpötilan laskiessa niin alas, ettei pinta kykene enää ylläpitämään kiehumista. Lämmönsiirto tapahtuu yksinomaan konvektiolla kappaleen pinnalta sammutusväliaineeseen saaden aikaan vain hitaan jäähtymisnopeuden. Jäähtymisnopeuteen vaikuttavat pääasiassa sammutusväliaineen viskositeetti, lämpötila sekä sekoitusnopeus. Sekoitusnopeutta lisäämällä saadaan konvektio pakotettua nopeammaksi, jolloin lämmönsiirto tehostuu. /9/

Konvektiovaiheen jäähtymisnopeudella on suuri merkitys sammutuksessa syntyviin jäännösjännityksiin, muodonmuutoksiin sekä halkeiluun, koska konvektiovaihe esiintyy usein martensiitin muodostumisen lämpötila-alueella. /11/

4.1.4 Sammutusväliaineen sekoituksen vaikutus jäähtymisvaiheisiin

Sekoitus vaikuttaa eniten jäähtymisen höyrykalvovaiheeseen, koska se tuhoaa kappaleen ympärille muodostuneen höyrykalvon ja estää uuden kalvon syntymistä. Kiehuntavaiheeseen sekoitusnopeudella ei juuri ole vaikutusta, mutta jäähtymisen siirtyessä konvektiovaiheeseen sekoituksen vaikutus jäähtymisnopeuteen jälleen kasvaa. /28/

Kuvassa 25 on esitetty sekoitusnopeuden vaikutus 45 °C öljyn jäähtymisvaiheisiin.



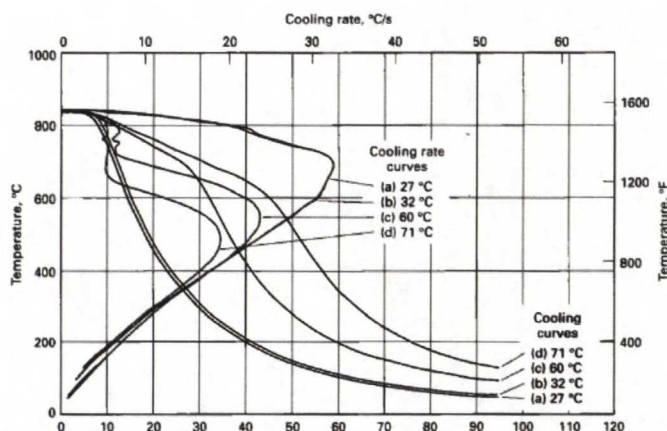
Kuva 25 Sekoitusnopeuden vaikutus jäähtymisvaiheisiin /23/

Karkenemisen varmistamiseksi sammutusväliaineen sekoitusnopeus ja samalla kappaleen jäähtymisnopeus pyritään maksimoimaan sammutuksen alkuvaiheissa. M_s -lämpötilan alapuolella eli konvektiovaiheessa kappaleen jäähtymisnopeus on perinteisesti pyritty minimoimaan /28/. N.I. Kobasko on kuitenkin osoittanut erittäin nopean jäähtymisnopeuden martensiitin muodostumisalueella itse asiassa vähentävän halkeilua ja suuria muodonmuutoksia.

Sekoituksesta voi olla haittaa, jos se ei ole tarpeeksi voimakasta tai tasaista koko sammutettavan kappaleen pinnalla. Epätasaisen tai liian hitaan sekoituksen vaikutuksesta kappaleen pinnalle muodostuva höyrykalvo voi tulla epätasaiseksi tai katkonaiseksi. Tämän seurauksena lämmönsiirtonopeudet vaihtelevat kappaleen eri osissa, mikä puolestaan johtaa syntyvien suurten lämpötilagradienttien takia halkeilun sekä suuriin muodonmuutoksiin. /28/

4.1.5 Sammutusväliaineen lämpötilan vaikutus jäähtymisvaiheisiin

Sammutusväliaineen lämpötilan vaikutus kappaleen kolmeen jäähtymisvaiheeseen riippuu käytettävästä sammutusväliaineesta. Vesipohjaisilla sammutusväliaineilla höyrykalvovaiheen kesto pitenee huomattavasti lämpötilan noustessa ja lähestyessä samalla veden kiehumispistettä. Tämä on seurausta veden luontaisesta ominaisuudesta muodostaa vesihöyryä lämpötilan lähestyessä kiehumispistettä. Kiehun- ja konvektiovaiheisiin veden ja vesipohjaisten sammutusväliaineiden lämpötilan nostolla ei ole huomattavaa vaikutusta. Tästä voidaan päätellä kokonaisjäähtymisnopeuden hidastuvan veden ja vesipohjaisten sammutusväliaineiden lämpötilan noustessa /11/. Kuvasta 26 on nähtävissä veden lämpötilan vaikutus jäähtymisvaiheisiin.

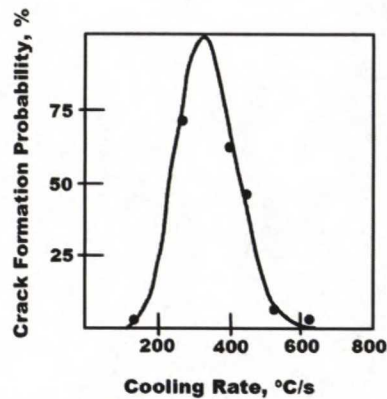


Kuva 26 Veden lämpötilan vaikutus jäähtymisvaiheisiin /14/

Öljypohjaisille sammutusväliaineille lämpötilan vaikutus on päinvastainen. Öljyn lämmitessä sen viskositeetti pienenee ja liikkuvuus paranee, jolloin se pystyy rikkomaan muodostuvan höyrykalvon tehokkaammin. Kiehuntavaiheeseen öljyn lämpötilalla ei juuri ole merkitystä. Konvektiovaiheessa jäähtymisnopeus hidastuu lämpötilan noustessa, jolloin jäähtymisnopeus martensiitin muodostumisalueella hidastuu ja todennäköisyys vääristymille ja halkeilulle pienenee. Yleisesti, karkaisuöljyn lämpötilan noustessa kokonaisjäähtymisnopeus kasvaa tiettyyn lämpötilaan saakka. Kappaleen jäähtymisnopeus hidastuu kuitenkin jälleen, kun öljyn lämpötila nousee riittävän korkeaksi. /11/

5 Intensiivinen sammutus

Intensiivisessä sammutuksessa sammutusväliaineena käytetään puhdasta vettä tai laimeaa suolavesiliuosta, joita sekoitetaan voimakkaasti. Sammutusnopeus on huomattavasti suurempi kuin nykyään muuten yleisesti käytetyillä sammutusmenetelmillä. Intensiivisessä sammutuksessa jäähtymisnopeus on suuri myös martensiitin muodostumisalueella, vaikka sitä pidetään yleisesti haitallisena. N.I. Kobasko on tutkimuksissaan osoittanut erittäin nopean ja tasaisen jäähtymisen vähentävän kappaleessa karkaisun aikana tapahtuvaa halkeilua sekä mitta- ja muodonmuutoksia /4, 17, 19/. Kuvassa 27 on esitetty kappaleen jäähtymisnopeuden vaikutus halkeiluriskiin. Tulokset on saatu todella pienellä sylinterimäisellä 6 mm halkaisijaltaan olevalla koekappaleella /3/. Kuvasta 27 on havaittavissa halkeiluriskin olevan pieni hitaalla sekä erittäin nopealla ja tasaisella jäähtymisellä.



Kuva 27 Teräskappaleen halkeiluriski sammutuksessa jäähtymisnopeuden funktiona /3/

Intensiivisen sammutuksen avulla on mahdollista saada aikaan yhä kestävämpiä kappaleita. Nopea ja tasainen jäähtymisnopeus saa aikaan suuren pintakovuuden, suuret puristusjäännösjännitykset kappaleen pintaan sekä syvemmän kareneen kerroksen, jonka seurauksen kappaleen mekaaniset ominaisuudet paranevat. Intensiivisesti sammutetun hiiliteräksestä valmistetun kappaleen käyttöikä voi olla 50...800 % pidempi kuin vastaavan öljyyn karkaistun seosteräksestä valmistetun kappaleen /32/.

Suuren jäähtymisnopeuden ansiosta intensiivisessä sammutuksessa on mahdollista käyttää vähemmän seostettuja ja siten halvempia teräksiä. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää ohuempia ainepaksuuksia saman lujuustason aikaansaamiseksi kuin hitaammilla sammutusmenetelmillä, jolloin kappaleet kevenevät. Koska sammutusväliaineena käytetään vettä tai laimeaa suolavesiliuosta, on intensiivinen sammutus puhdas ja ympäristöystävällinen vaihtoehto yleisesti käytetylle öljylle. /4/

Intensiivisessä sammutuksessa sammutusväliaineen sekoituksella on suuri vaikutus tarpeeksi suurien jäähtymisnopeuksien saavuttamiseksi. Sekoitusnopeuden tulee olla niin suuri, että sammutusväliaineen tehokkuutta kuvaava Grossmannin H-arvo ylittää arvon 6 /33/. Taulukossa 5 on Grossmannin H-arvoja muille sammutusväliaineille ja sekoitusnopeuksille. Suurin arvo 5 on annettu erittäin voimakkaalle sekoitukselle suolavesiliuoksessa, joka ei siis vielä ylitä intensiiviselle sammutukselle määritettyä Grossmannin H-arvoa.

Taulukko 5 Grossmannin H-arvoja eri sammutusväliaineille /6/

	Air	Oil	Water	Brine
No circulation of fluid or agitation of piece	0.02	0.25 to 0.30	0.9 to 1.0	2
Mild circulation (or agitation) . . . . .	...	0.30 to 0.35	1.0 to 1.1	2 to 2.2
Moderate circulation . . . . .	...	0.35 to 0.40	1.2 to 1.3	...
Good circulation . . . . .	...	0.4 to 0.5	1.4 to 1.5	...
Strong circulation	0.05	0.5 to 0.8	1.6 to 2.0	...
Violent circulation . . . . .	...	0.8 to 1.1	4	5

Lähteessä /34/ on kuvattu intensiivisen sammutuksen allas, jonka tilavuus on $39,7 \text{ m}^3$. Allas on varustettu neljällä sekoittimella, joita pyörittää neljä moottoria saaden sammutusväliaineen kokonaiskierrätykseksi $5,67 \text{ m}^3/\text{s}$. Keskimääräisen sammutusväliaineen virtausnopeudeksi altaassa on ilmoitettu olevan $1,6\text{--}1,8 \text{ m/s}$ kappaleen ympärillä.

5.1 Intensiivisen sammutuksen eri menetelmät

Intensiivisen sammutuksen menetelmiä on useita. Tässä esitellään niistä kolme, jotka on nimetty seuraavasti: IQ-1, IQ-2 ja IQ-3 /4, 19/. Kyseiset menetelmät eroavat toisistaan lämmönsiirtovaiheiden perusteella. IQ-1 menetelmässä tapahtuu kappaleen pinnalla sekä höyrykalvovaihe että kiehuntavaihe. IQ-2 menetelmässä höyrykalvovaihetta ei esiinny, joten lämmönsiirto tapahtuu kiehuntavaiheen ja sitä seuraavan konvektiovaiheen avulla. IQ-3 menetelmässä lämmönsiirto on niin nopeaa, ettei höyrykalvovaihetta eikä kiehuntavaihetta esiinny ollenkaan vaan jäähtyminen tapahtuu pelkästään konvektiolla. Kaikilla menetelmillä intensiivisen sammutuksen onnistumisen perustana on sammutuksen oikeanaikainen keskeyttäminen puristusjännitysten ollessa maksimiarvossaan.

IQ-1 on kaksivaiheinen intensiivisen sammutuksen menetelmä. Sitä käytetään keski- sekä runsaasti seostetuille teräslaaduille. Aluksi kappaleet jäädytetään hitaasti austenitointilämpötilasta martensiitin muodostumisen alkamislämpötilaan M_s . Tässä vaiheessa sammutusväliaineena voidaan käyttää esimerkiksi kuumaa öljyä tai väkevää vesi/polymeeri liuosta. Hitaan jäähtymisen ansiosta kappale jäähtyy tasaisesti, minkä seurauksena kappaleen lämpötilan voidaan olettaa olevan kauttaaltaan M_s toisen jäähtymisvaiheen alkaessa.

Toinen jäähtymisvaihe tapahtuu martensiitin muodostumisalueella. Suuri jäähtymisnopeus saadaan aikaan vesisuihkuilla tai sammutusväliaineen suunnatuilla virtauksilla. Sammutuksen toisen vaiheen nopea jäähtyminen aiheuttaa kappaleen pintaan suuret puristusjäännösjännitykset, jotka korjaavat kappaleeseen hitaassa sammutuksen ensimmäisessä vaiheessa syntyneet muodonmuutokset. Suuret puristusjäännösjännitykset kappaleen pinnassa myös lujittavat materiaalia.

IQ-1 -menetelmän huonoina puolina on sen ensimmäisen vaiheen hidas jäähtyminen, jonka seurauksena kappaleen karkeneminen ei ole niin suurta kuin se voisi olla. Lisäksi sammutuksen toinen vaihe vaatii erillisen jäähdytyskammion, joka tekee prosessista monimutkaisen ja kalliin.

IQ-2 menetelmä on puolestaan kolmivaiheinen. Aluksi tapahtuu nopea jäähtyminen kiehuntavaiheella, jota seuraa hidas jäähtyminen ilmassa ja konvektiolla tapahtuva jäähtyminen karkaisualtaassa. IQ-2 -menetelmässä satunnaisen höyrykalvovaiheen kesto minimoidaan halkeilun ja vääristymisen ehkäisemiseksi. Koska höyrykalvon muodostuminen kappaleen ympärille halutaan estää, puhdasta vettä ei voida käyttää

sammutusväliaineena. Puhtaan veden sijasta käytetään erilaisia laimeita suolavesiliuoksia. Suolavesiliuoksen höyrykalvovaihetta estävä vaikutus perustuu liuoksen sisältämiin negatiivisesti varautuneisiin ioneihin, jotka kerääntyvät liuokseen upotetun positiivisesti varautuneen kappaleen pinnalle. Suolaionit yhdessä tarpeeksi nopean sammutusväliaineen virtauksen kanssa tuhoavat höyrykalvon kuvan 24 mukaisesti.

IQ-2 menetelmässä jäähdytyksen ensimmäisessä vaiheessa martensiittia muodostuu nopeasti kappaleen pintaan. Jäähdytys keskeytetään, kun kappale ei ole vielä karennut eli sen pinnassa on vähemmän kuin 50 % martensiittia. Tällöin kappale on vielä plastinen, jonka seurauksena voidaan välttyä pinnan halkeilulta. Nopean jäähtymisen keskeytyksen jälkeen kappale jatkaa jäähtymistä ilmassa. Tämän sammutuksen toisen vaiheen aikana, martensiittisessa kappaleen pintakerroksessa tapahtuu itsestään kappaleen kuumasta keskustasta tulevalle lämmölle. Toisen vaiheen aikana kappaleen lämpötila tasaantuu koko poikkipinta-alaltaan sekä ensimmäisen sammutusvaiheen aikana syntyneet puristavat jäännösjännitykset poistuvat. Lopputuloksena on lujittunut martensiittinen pintakerros, joka estää kappaleen halkeilua sammutuksen kolmannen vaiheen aikana. Sammutuksen kolmannessa vaiheessa kappale jäähtyy jälleen nopeasti. Voimakkaan konvektion avulla saadaan aikaan vaadittavat lopulliset faasitransformaatiot koko kappaleessa.

IQ-2 -menetelmän rajoituksena on se, ettei suolavesiliuoksen kiehumispiste vastaa aina martensiitin muodostumisen loppumislämpötilaa kaikilla teräsladuilla.

IQ-3 on kaikista nopein ja paras menetelmä, jos paremmuutta mitataan optimisyvyydellä olevien pinnan suurten puristusjännitysten perusteella. IQ-3 menetelmässä on vain yksi jäähdytysvaihe, toisin kuin kahdessa aiemmin esitetyssä intensiivisen sammutuksen menetelmässä. Jäähtymisen lämmönsiirtomenetelmänä on yksinomaan konvektio. Syynä tähän on kappaleen pinnan erittäin nopea jäähtyminen, jolloin höyrykalvovaihetta ja kiehuntavaihetta ei esiinny lainkaan.

IQ-3 -menetelmässä nopea jäähtyminen on jatkuvaa ja tasaista koko kappaleen pinnalla siihen asti, kunnes pinnan puristusjännitykset saavuttavat maksimiarvonsa ja optimisyvyytensä kappaleen geometriasta riippuen. Kappaleen sammutus keskeytetään pinnan puristusjännitysten saavuttaessa maksimiarvonsa. Tällöin karenneen kerroksen paksuus on optimi. Jos sammutusta ei tällöin keskeytettäisi, pinnan puristusjännitykset rupeaisivat laskemaan kappaleen ytimen jäähtyessä edelleen sammutusväliaineen lämpötilaan.

IQ-3 -menetelmässä on myös omat ongelmansa. Ensinnäkin on huomioitava, ettei aina voida saada aikaan nopeaa ja tasaista vesivirtausta kauttaaltaan koko kappaleen ympärille, etenkin kappaleen geometrian ollessa monimutkainen. Toiseksi ohuilla kappaleilla on mahdotonta saada aikaan sopivaa lämpötilagradienttia kappaleeseen, jolloin pinta muodostuisi täysin martensiittiseksi ytimen jäädessä vielä austeniittiseksi, joka muuttuisi edelleen välisijafaaseiksi. Kolmanneksi IQ-3 menetelmä ei sovi panosten karkaisuun, koska on käytännössä mahdotonta saada aikaan nopeaa ja tasaista

vesivirtausta koko panokseen. IQ-3 menetelmä soveltuukin paksuille ja yksinkertaisille yksittäisille kappaleille. Panoksessa olevat monimutkaiset ja ohuet kappaleet saadaan karkaistua aiemmin esitetyllä IQ-2 menetelmällä.

5.2 Puristusjännitysten muodostuminen

Aiemmin on luultu kappaleen pintaan muodostuvan aina vetojännitystila, jos se karkaistaan läpi. Vuonna 1983 suoritettujen numeeristen simulointien perusteella voitiin kuitenkin todeta, että läpikarkaistun kappaleen pintaan on mahdollista saada puristusjäännösjännitystila Biotin luvun ollessa tarpeeksi suuri, suurempi kuin 18. Samoihin aikoihin havaittiin puristusjännitysten ensin kasvavan maksimiarvoonsa ja sen jälkeen pienenevän muuttuen lopulta vetojännitykseksi martensiittitransformaation edetessä kappaleen pinnalta keskustaan päin. Tämän perusteella voitiin päätellä, että on olemassa ihanteellinen karenneen kerroksen syvyys, jolla pinnan puristusjäännösjännitykset ovat maksimiarvossaan. /35/

Nykyään jäännösjännityksiä uskotaan pystyttävän kuvaamaan yleisellä dimensiottomalla Biotin luvulla Bi_v . Yleinen Biotin luku /35/ on määritetty funktiona

$$Bi_v = \left(\frac{\alpha}{\lambda} \right) K \left(\frac{S}{V} \right), \quad (5)$$

jossa α = lämmönsiirtokerroin (W/m^2K)
 λ = lämmönjohtavuus (W/mK)
 K = Kondratjevin muototekijä kappaleelle (m^2)
 S = pinta-ala (m^2)
 V = tilavuus (m^3)

Kondratjevin muototekijä /35/ sylinterille on

$$K = \frac{R^2}{5,783} \quad \text{ja pallolle} \quad K = \frac{R^2}{\pi^2}, \quad (6), (7)$$

jossa R = säde (m).

Edellä olevista kaavoista havaitaan, että jäännösjännitysten kuvaamiseen käytettävän yleiseen Biotin lukuun vaikuttavat lämmönsiirtokerroin kappaleen ja sammutusväliaineen välillä, materiaalin lämmönjohtavuus sekä kappaleen pinta-ala, tilavuus, säde ja muoto.

Biotin luvun ollessa pieni, kappale jäähtyy tasaisesti ja sen lämpötilan voidaan olettaa olevan tasainen koko jäähdytyksen ajan. Tämän seurauksena hetkelliset jännitykset sammutuksen aikana eivät ole suuria martensiitin muodostuessa tasaisesti koko

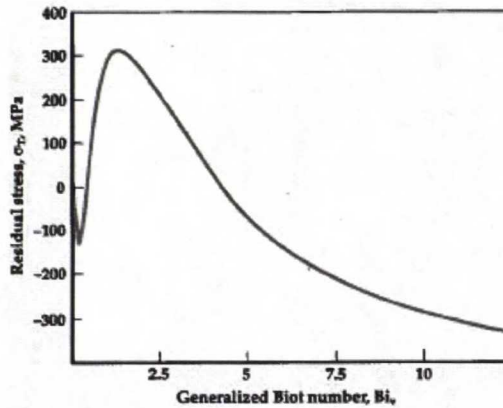
kappaleessa. Sammutuksen loppuvaiheessa, kappaleen keskustan muuttuessa martensiittiseksi, muodostuu suuria voimia, jotka aiheuttavat kappaleen pintaan vetojännitystilän. /20/

Intensiivisestä sammutuksesta puhutaan silloin, kun Biotin luku on suurempi kuin 20 /20/. Tällöin martensiitin muodostuminen alkaa kappaleen pinnasta lämpötilan ollessa muualla vielä korkea.

Biotin luvun kasvaessa lämpötilaero kappaleen pinnan ja keskustan välillä kasvaa. Ennen kappaleen keskustan jäähtymistä kaksi prosessia kilpailee keskenään. Kappale pyrkii toisaalta kutistumaan lämpötilan laskun seurauksena, mutta toisaalta se pyrkii myös laajenemaan martensiittitransformaation seurauksena. Intensiivisen sammutuksen tapauksessa, Biotin luvun ollessa suurempi kuin 20, kutistumisprosessi hallitsee kappaleen sisäosissa. Kappaleen sisustan kutistuessa vastamuodostunut martensiittinen pintakerros pakotetaan siirtymään lähemmäksi keskustaa, jonka seurauksena kappaleen pintaan syntyy puristusjäännösjännitystila. /20/

Biotin luvun ollessa huomattavasti pienempi kuin 18, kappaleen sisusta laajenee martensiittitransformaation seurauksena. Tällöin sisus pyrkii työntämään sammutuksen alkuvaiheissa muodostunutta martensiittistä ulkokuorta ulospäin, jonka seurauksena kappaleen pintaan syntyy haitallinen vetojäännösjännitystila. /20/

Kuvassa 28 on esitetty kappaleen pinnan jäännösjännitystila puolestaan yleisen Biotin luvun eri arvoilla. Yleisen Biotin luvulla noin 4,3 kappaleen pinnan jäännösjännitystila muuttuu vetojännityksestä puristavaksi.



Kuva 28 Kappaleen pinnan jäännösjännitystila yleisen Biotin luvun funktiona /35/

Jäähtymisnopeus martensiitin muodostumisalueella vaikuttaa kappaleen pintaan syntyvään jäännösjännitystilaan. Se voidaan kuvata yhtälöllä /35/

$$V = \frac{a \cdot Kn(T - T_m)}{K}, \quad (8)$$

jossa V = jäähtymisnopeus kappaleen keskellä ($^{\circ}\text{C/s}$)

a = keskimääräinen lämpödiffusiviteetti (m^2/s)

Kn = Kondratjevin luku

K = Kondratjevin muototekijä (m^2)

T = lämpötila kappaleen keskellä ($^{\circ}\text{C}$)

T_m = sammutusväliaineen lämpötila ($^{\circ}\text{C}$)

Kondratjevin luku /35/ saadaan määritettyä yleisen Biotin luvun avulla seuraavasti

$$Kn = \Psi Bi_v, \quad (9)$$

jossa Ψ = lämpötilakentän epätasaisuuden kriteeri /37/

$$\Psi = \frac{1}{(Bi_v^2 + 1,437 Bi_v + 1)^{0,5}}. \quad (10)$$

Erittäin suurten puristusjännitysten aikaansaamiseksi kappaleen pintaan Kondratjevin luvun tulisi olla välillä 0,8...1 /35/. Tällaiset olosuhteet on mahdollista saada aikaan vesisuihkuilla tai nopeasti virtaavalla vedellä. Tämä johtaa myös pinnan ylilujittumiseen. Kappaleen pinnan suurten puristusjännitysten sekä ylilujittumisen seurauksena kappaleen kestävyys ja käyttöikä pitenevät.

Intensiivisen sammutuksen oikea-aikainen keskeytys on tärkeää suurten puristusjännitysten aikaansaamiseksi kappaleen pintaan. Kun intensiivinen sammutus keskeytetään kappaleen pinnan puristusjännitysten ollessa maksimiarvossaan ja kappaletta pidetään isotermisesti martensiitin muodostumisen alkamislämpötilassa, martensiitin muodostuminen keskeytyy ja suuret puristusjännitykset jäävät kappaleen pintaan. /32/

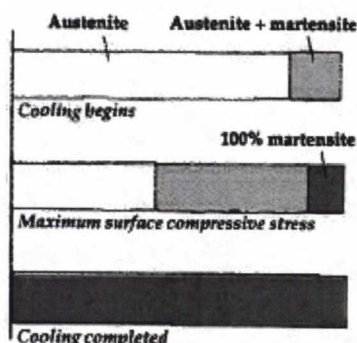
5.3 Ylilujittuminen

Pinnan suurten puristusjännitysten lisäksi intensiivisesti sammutettua kappaletta lujittaa ilmiö, jota N.I. Kobasko kutsuu nimeltä ”ylilujittuminen” (superstrengthening). Kappaleen ylilujittumisen aiheuttaa mekanismi, jolla martensiittilevyt muodostuvat kyseisessä ilmiössä suuressa puristusjännitystilassa olevaan alijäähtyneeseen austeniittiin. Martensiitin suuremman ominaistilavuuden vuoksi, muodostuvat martensiittilevyt laajenevat austeniittiin aiheuttaen siihen suurta plastista deformaatiota. Tämän seurauksena kappaleen pintaan muodostuu runsaasti dislokaatioita, jotka erittäin nopean jäähtymisen seurauksena lukkiutuvat karenneeseen pintakerrokseen. Tämän uskotaan lujittavan kappaletta lisää. Edellytyksenä kyseiselle ilmiölle ovat nopea jäähtymisnopeus martensiitin muodostumisalueella sekä pinnan suuret puristusjännitykset. /36/

5.4 Karkenemissyvyys

N.I. Kobaskon kokeet ovat osoittaneet karenneen kerroksen optimisyvyyden vastaavan pinnan suurinta puristusjännitystä, joka puolestaan riippuu kappaleen geometriasta ja dimensioista. Jotta intensiivisellä sammutuksella saataisiin aikaan mahdollisimman hyvä lopputulos, tulisi teräslaatu valita kappaleen geometrian mukaan, jotta varmistetaan karkenemisen tapahtuvan optimisyvyydelle saakka. Nopeutetulla sammutuksella on oikean teräslaadun kanssa mahdollista saavuttaa kappaleen pintaan suuret puristusjäännösjännitykset, suuri lujuus ja kulumiskestävyys sekä suhteellisen pehmeä ja sitkeä, mutta kuitenkin tarpeeksi luja kappaleen sisusta. /37/

Kuvassa 29 on esitetty mikrorakenteen eri faasien suhteelliset määrät, jolla karenneen kerroksen optimisyvyys saavutetaan.



Kuva 29 Mikrorakenteen faasien suhteelliset määrät, joilla saavutetaan maksimi puristusjäännösjännitystila kappaleen pintaan /37/

Jotta suuret puristusjäännösjännitykset saataisiin aikaan kappaleen pintaan, pitäisi Kondratjevin luvun olla välillä 0,8...1, kuten aiemmin jo todettiin. Tällöin jäähtymisnopeus on suuri myös kappaleen keskikohdassa, mutta hidastuu pinnan puristusjännitysten saavuttaessa maksimiarvonsa. Tämän seurauksena kappaleen ytimen mikrorakenteesta tulee bainiittinen tai päästömartensiittinen.

Karenneen kerroksen optimisyvyyden ennustaminen vaatii sen, että tiedetään aika, jossa pinnan puristusjännitykset saavuttavat maksimiarvonsa. On kehitetty kaavat /37/, joilla kyseisen ajan laskeminen on mahdollista.

$$Fo_v \cdot Kn = A(Bi_v) + \ln \Theta_{op}, \quad (11)$$

jossa Fo_v = yleinen Fourierin luku

Kn = Kondratjevin luku

$A(Bi_v)$ = yleisen Biotin luvun funktio

Θ = lämpötilojen suhde

Toinen mahdollinen kaava /37/ ajalle, jossa pinnan puristusjännitykset saavuttavat maksimiarvonsa on

$$\left(\frac{at}{K}\right)Kn = \left(\frac{kBi_v}{2,091 + 3867Bi_v}\right) + \ln\left(\frac{T_0 - T_m}{T_{op} - T_m}\right), \quad (12)$$

jossa a = lämpödiffuusiokyky (m^2/s)

t = aika, jossa maksimi puristusjännitykset saavutetaan (s)

K = Kondratjevin muototekijä kappaleelle, m^2

Kn = Kondratjevin luku

k = 1, 2 tai 3 riippuen siitä onko kappale tasomainen, sylinterimäinen vai pallomainen

T_0 = austenitointilämpötila

T_m = sammutusväliaineen lämpötila

T_{op} = kappaleen keskustan lämpötila, kun pinnassa on maksimi puristusjännitystila

Pinnan puristusjännitykset ovat silloin maksimissaan, kun kappaleen ytimen lämpötila on lähes martensiitin muodostumisen lämpötilassa.

Hernandez-Morales on puolestaan ehdottanut karenneen kerroksen optimaalisen syvyyden suhteen sylinterin säteeseen olevan 0,13 kaavan

$$\frac{\Delta r}{R} = 0,13 \quad (13)$$

mukaisesti /38/.

5.5 Martensiitin muodostuminen intensiivisessä sammutuksessa

Perinteisessä karkaisussa kappaleen paksuuden vaihdellessa martensiittia muodostuu ensin nopeasti jäähtyviin ohuisiin osiin ja sen jälkeen vasta kappaleen paksumpiin osiin, jotka saavuttavat myöhemmin M_s -lämpötilan, kuva 30 a. Martensiitin suuremman ominaistilavuuden seurauksena kappaleen ohuet kohdat laajenevat paksumpien kohtien yhä kutistuessa jäähtymisen seurauksena. Kappaleen paksut kohdat laajenevat vasta sitten, kun niissä tapahtuu martensiittitransformaatio. Epätasaisen jäähtymisen ja eriaikaisen martensiittitransformaation seurauksena kappaleeseen syntyy jännityksiä, jotka aiheuttavat vetelyä ja mahdollisesti halkeilua. /4, 32/

Sammutusnopeuden ollessa riittävän suuri ja tasainen, martensiittia muodostuu tasaisesti koko kappaleen pintaan, saaden aikaan tasaisen karenneen kuoren, kuva 30 b. Kyseinen kuori saa kappaleen pintaan aikaan suuren puristusjännitystilaa, jonka seurauksena kappaleen vääristyminen ja halkeilu estyvät. /4, 32/

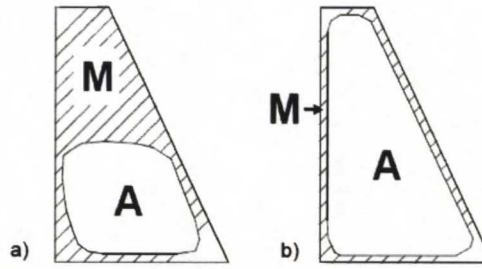
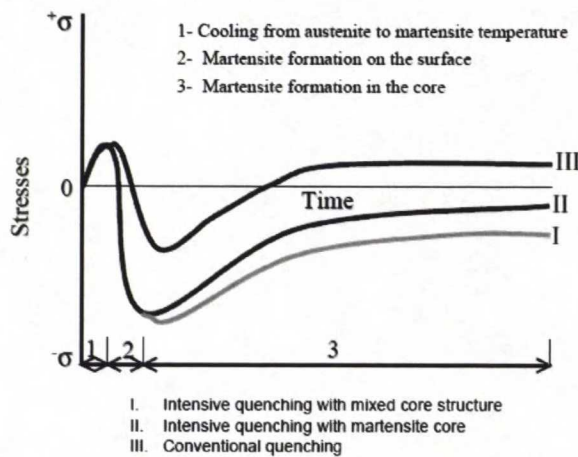


Figure 2 Martensite Formation During Drenching
a) Conventional quenching, b) Intensive quenching

Kuva 30 Vasemmalla martensiitin muodostuminen perinteisessä sammutuksessa ja oikealla intensiivisessä sammutuksessa /4/

Intensiivisessä sammutuksessa kappaleen pinta saavuttaa martensiitin alkamislämpötilan niin nopeasti, ettei kappaleen ydin ole vielä kerinnyt jäähtymään vaan on vielä käytännössä katsoen alkuperäisessä austenitointilämpötilassa. Juuri ennen kappaleen ytimen saavuttamista martensiitin muodostumisen alkamislämpötilan, pinnan puristusjännitykset ovat maksimiarvossaan. Tällöin nopea ja tasainen jäähdytys keskeytetään siirtämällä kappale pois sammutusväliaineesta. Kappaleen jäähtyminen hidastuu sekä kappaleen pinnalla että ytimessä, jolloin ytimen muuttuminen martensiittiseksi hidastuu tai jopa keskeytyy tarpeeksi paksuilla kappaleilla. Jos martensiitin muodostuminen keskeytyy, muuttuu kappaleen ytimen austeniitti välifaaseiksi kuten bainiitiksi, ferriitiksi ja perliitiksi. Tämän seurauksen ytimen rakenteen ominaistilavuus on pienempi kuin täysin martensiittisen kuoren, jolloin saavutetaan suuremmat pinnan puristusjäännösjännitykset kuin täysin karsenneella kappaleella. Tosin myös intensiivisellä sammutuksella saadun täysin martensiittisen rakenteen omaavilla kappaleilla on suuremmat puristusjännitykset pinnassa kuin perinteisesti läpikarkaistuilla kappaleilla, joilla on pinnassa vetojännityksiä tai jännityksiä ei ole juuri lainkaan, kuva 31. /4, 32/



Kuva 31 Kappaleeseen muodostuva jäännösjännitystila intensiivisessä sekä perinteisessä sammutuksessa /4/

Intensiivisessä sammutuksessa muodostuvan martensiitin rakenne on myös erilaista kuin tavallisessa karkaisussa saatavat säle- tai leymartensiitti. Intensiivisessä sammutuksessa martensiitti muodostuu niin sanotuksi pakettimaiseksi rakenteeksi. /32/

5.6 Koetuloksia kirjallisuudesta

Intensiivisen sammutuksen tuloksia on julkaistu pääasiassa pienille kappaleille kuten hammaspyörille, laakereille sekä pulteille. Tulokset osoittavat kiistatta sen, että intensiivisellä sammutuksella kappaleen mekaaniset ominaisuudet saadaan paremmiksi kuin esimerkiksi yleisesti käytetyllä öljysammutuksella. Mekaanisten ominaisuuksien parantumisen seurauksena kappaleiden käyttöiät pitenevät. Syynä mekaanisten ominaisuuksien paranemiseen on intensiivisessä sammutuksessa syntyvä puristusjäännösjännitystila kappaleen pintaan sekä suurempi karkenemissyvyys, jonka seurauksena kappaleen veto- ja murtolujuus, iskutkeys sekä kovuustaso etenkin kappaleen keskustassa paranevat. Käytettäessä öljykarkaisua ja karkaistaessa kappale läpi, kappaleen pintaan muodostuu haitallinen vetojäännösjännitystila. Tehtyjen tutkimusten mukaan intensiivisen sammutuksen jälkeen ei myöskään ole havaittavissa karkaisuhalkeilua ja karkaisun yhteydessä syntyvät mitta- ja muodonmuutokset ovat pienempiä kuin esimerkiksi öljysammutuksessa. Tähänkin on syynä kappaleen pintaan muodostuva puristusjäännösjännitystila. /3, 4, 17, 19/

Teräksestä AISI 1547 valmistetulle sylinterille, jonka halkaisija on 73 mm, on tehty koe, jossa on verrattu teräksen karkenevuutta intensiivisessä sammutuksessa ja öljysammutuksessa. Karkenevuuden syvyyden havaittiin olevan seitsemän kertaa suurempi intensiivisessä sammutuksessa kuin öljysammutuksessa mitattaessa karkenevuutta kovuudella 50 HRC. /19/

Teräksestä AISI 9259 valmistettu kierrejousi, jonka halkaisija on 152 mm, pituus 547 mm ja käytetyn langan halkaisija 21 mm, sammutettiin intensiivisesti ja tuloksia verrattiin samanlaiseen kierrejouseen, joka oli karkaistu öljyyn. Saaduista mittaustuloksista on havaittavissa intensiivisesti sammutetun kierrejousen huomattavasti parempi mikrorakenne kuin öljyyn sammutetun. Intensiivisesti sammutetun kierrejousen raekoko oli 9 ASTM ja mikrorakenne kappaleen pinnalta oli täysin päästömartensiittinen ja keskustan bainiittipitoisuus oli vain 2...5 %. Öljyyn sammutetun kierrejousen raekoko oli puolestaan 8 ASTM ja mikrorakenteessa oli huomattavasti enemmän bainiittia, pinnalla 5...10 % ja keskustassa 15...20 %. Lujuudessa ei tosin ollut havaittavissa suurtakaan eroa. Pinnan jäännösjännitykset puolestaan olivat ennen hiekkapuhallusta intensiivisesti sammutetulla kierrejousella puristavia ja öljyyn sammutetulla vetäviä. Kuulapuhalluksen jälkeenkin intensiivisesti sammutetulla kierrejousella oli kappaleen pinnassa suuremmat puristusjännitykset kuin öljyyn sammutetulla. Teräksestä AISI 5160H valmistetulla lehtijousella on saatu samansuuntaisia tuloksia. /19/

Intensiivisen sammutuksen vaikutusta kappaleen kovuuteen ja muodonmuutoksiin on tutkittu myös AISI 1045 -teräksestä valmistetulla akselilla, jonka halkaisija on 25,4 mm ja pituus 254 mm. Akselissa on lisäksi dimensioiltaan 6,4 mm x 6,4 mm oleva ura koko akselin pituudelta. Intensiivisellä sammutuksella saatiin kovempia ja vähemmän vääristyneitä kappaleita kuin öljysammutuksella. /19/

Intensiivistä sammutusta on tutkittu myös hiiletetyillä teräksillä. Tutkitut koekappaleet olivat AISI 8617-teräksestä valmistettuja kuulalaakerin pesiä. Kokeen tarkoituksena oli ollut tutkia olisiko pienemmällä hiiletetyksellä mahdollista saada riittävä kovuustaso ja ehkäistä muodonmuutosten syntyminen. Hiilettyisyvyyttä oli kyseisessä tutkimuksessa vähennetty 50 %. Havaittiin intensiivistä sammutusta käyttämällä olevan mahdollista vähentää hiilettyisyvyyttä ja saada silti paremmat lujuusominaisuudet sekä kappaleen muodon pysyvyys. /19/

Simuloimalla on tutkittu intensiivisen sammutuksen käyttömahdollisuutta myös suuremmille kappaleille kuten paineastioille. Tutkittava paineastia oli 4340-teräksestä valmistettu sylinterinmallinen paineastia, jonka ulkohalkaisija oli 4572 mm, sisähalkaisija 228,6 mm ja pituus 1270 mm. Kyseisen simuloinnin perusteella intensiivinen sammutus soveltuisi suuremmillekin kappaleille kuin pienille hammaslaakereille ja pulteille. /3/

Perinteisesti erilaisten boorilla seostettujen kulutuslevyterästen karkaisussa käytetään vettä sammutusväliaineena. Sammutus suoritetaan ruiskuttamalla vettä suurella paineella levyn pintaan, joten luultavaa on, että saavutetaan intensiivisen sammutuksen jäähtymisnopeudet. Menetelmää voisi verrata intensiivisen sammutuksen menetelmään IQ-3. Kulutuslevyteräksiä käytetään yleisesti muun muassa kauhakuormureiden kauhoissa, murskaimissa, dumpperien lavoissa sekä betonisekoittimissa. /39, 40/

6 Karkaisun simulointi

Itse karkaisuprosessin aikana ei voida seurata kappaleen kovuusjakauman, jännitystilan sekä mitta- ja muodonmuutosten kehittymistä kappaleessa. Lopputulos pystytään havainnoimaan vasta prosessin jälkeen. Nykyään on kehitetty numeerisia simulointimenetelmiä, joilla voidaan ennustaa tapahtuvia faasimuutoksia, syntyvää jäännösjännitystilaa sekä kappaleessa tapahtuvia mitta- ja muodonmuutoksia. /41/

Lämpökäsittelyprosessien numeerisen mallinnuksen käyttö niin tutkimuslaitoksissa kuin teollisuudessa on kasvanut viime vuosien aikana ja kasvaa edelleen. Tietokonesimulointiohjelmat perustuvat yleisesti finite difference -menetelmään, finite element -menetelmään, volume integral -menetelmään, boundary element -menetelmään sekä näiden muunnoksiin ja yhdistelmiin /42/. Simuloimalla karkaisuprosessia lämpökäsittelijät pyrkivät lyhentämään toimitusaikoja sekä vähentämään uusintakäsittelyjen ja romutuksen määrää sekä ratkaisemaan lämpökäsittelyissä yleisesti esiintyviä ongelmia /41/. Perinteisesti suunnittelijat ovat ensin suunnitelleet kappaleen,

minkä jälkeen lämpökäsittelijöiden on täytynyt suunnitella kyseiselle kappaleelle sopiva käsittely. Nykyään suunnittelijat ja lämpökäsittelijät ovat kuitenkin alkaneet tehdä yhteistyötä jo kappaleen suunnitteluvaiheessa, jolloin kappaleen onnistunut lämpökäsittely varmistuu.

Karkaisuprosessin numeerisessa simuloinnissa on kuitenkin ongelmia. Näitä ovat lämpötilahistorian, kappaleen lämpötilajakauman, faasijakauman sekä mekaanisten ominaisuuksien vaikutusten ennustaminen. Tapahtuvat faasimuutokset riippuvat yhtä paljon lämpötilahistoriasta kuin jännitysjakaumastakin eivätkä ne myöskään tapahdu tasaisesti koko kappaleessa. Tämän seurauksena faasijakauma vaihtelee prosessin kulun aikana kappaleen eri osissa. Lämpötilan lasku sammutuksessa ei myöskään ole tasaista vaan lämpötila jopa nousee välillä faasimuutosten seurauksena. Lähteen /42/ mukaan tietokonemallinnuksessa on olemassa kolme tekijää, jotka aiheuttavat epätarkkuutta lopputulokseen. Nämä ovat virheet laskennassa, prosessin matemaattisessa kuvauksessa sekä materiaaliominaisuuksissa ja prosessiparametreissa. Kappaleen rakenteen muutoksia sekä sammutusta kuvaavat matemaattiset mallit on kehitetty kokeellisesta datasta, jotka puolestaan riippuvat käytetyistä koeparametreista, koemateriaalin koostumuksesta sekä kokeen kulusta. Kyseiset mallit eivät ole siten mitenkään tarkkoja ja yleispäteviä. Pääsyyinä simuloinnin virheisiin ovatkin tarkasteltavaa lämpökäsittelyprosessia kuvaavien reunaehtojen epätarkkuus ja puutteelliset tiedot materiaalin mekaanisista, fysikaalisista ja termisistä ominaisuuksista. Läheskään kaikille teräslaaduille ei ole olemassa kokeellista dataa, joiden perusteella simulointimallit voitaisiin tehdä.

Karkaisun tietokonesimulointi voidaan lähteen /43/ mukaan jakaa kolmeen pääalueeseen. Nämä ovat jäähtymisnopeuksien ja kappaleen ominaisuuksien ennustaminen, sammutusväliaineen virtauksen simulointi ja lämpökäsittelyssä syntyvien jäännösjännitysten sekä mitta- ja muodonmuutosten laskeminen.

6.1 Simulointiin tarvittava data

Simulointiin tarvittava data jaetaan lähteen /44/ mukaan neljään luokkaan termofysikaaliseen ja termomekaaniseen dataan, faasimuutosten kulun parametreihin sekä prosessiparametreihin, taulukko 6. Termofysikaalista dataa ovat muun muassa materiaalin lämmönjohtavuus, tiheys sekä lämpökapasiteetti. Termomekaanista dataa ovat kimmomoduuli, poikittaistukistuminen, jännitys-venymä -käyrä ja venymän riippuvuus lämpötilasta, rakenteesta sekä koostumuksesta. Faasimuutoksia kuvataan muutoskinetiikan parametrien avulla sekä lisäksi muutosentalpian, -venymän sekä -plastisuuden avulla. Prosessiparametreja ovat puolestaan karkaistavan kappaleen geometria, lämmönsiirtyminen, ympäristön lämpötila sekä massavirtaus.

Taulukko 6 Esimerkki simulointiin tarvittavasta datasta /44/

thermo-physikalisch	Umwandungsverhalten	thermo-mechanisch	Prozess-Parameter
<ul style="list-style-type: none"> • Wärmeleitfähigkeit • Wärmekapazität • Dichte • Diffusionskoeffizient 	<ul style="list-style-type: none"> • Umwandlungsstart • Umwandlungsende • Umwandlungskinetik • Umwandlungsenthalpie • Umwandlungsdehnungen • Umwandlungsplastizität 	<ul style="list-style-type: none"> • thermische Dehnungen • E-Modul • Querkontraktion • Spannungs-Dehnungs-Kurven 	<ul style="list-style-type: none"> • Wärmeübergang • Umgebungstemperatur • Massenstrom • C-Pegel • ...

Tarkkaa simulointia varten tarvittavan datan määrä on näin ollen valtava. Datan hankkimista vaikeuttaa entisestään joidenkin parametrien riippuvuus lämpötilasta, jolloin pitäisi selvittää kyseinen data koko karkaisun lämpötilavälillä. Lisäksi lämpökäsittelyprosessien tarkkaa simulointia hankaloittaa lämpökäsittelyprosessien monimutkaisuus. Karkaisuprosessin numeerisessa mallinnuksessa täytyy ottaa huomioon monimutkaiset vuorovaikutukset lämmönjohtumisen, faasimuutosten sekä mekaanisen käyttäytymisen kuten esimerkiksi tilavuuden muutoksen välillä. Ei riitä, että tiedetään tarkka matemaattinen malli karkaisuprosessin aikana esiintyvistä fysikaalisista ilmiöistä, vaan täytyy olla myös tarkkaa tietoa materiaaliominaisuuksista kuten myötölujuudesta sekä elastisuudesta, jotka riippuvat puolestaan lämpötilasta sekä mikrorakenteesta. /41, 45/

6.2 Jäähdytysnopeuksien simulointi

Kappaleen jäähdytymisen simulointi vaatii tietoa materiaalin ominaisuuksista kuten tiheydestä, lämmönjohtavuudesta sekä lämpökapasiteetista. Nämä ominaisuudet vaihtelevat lämpötilan mukaan, joten simuloinnissa käytettävän datan täytyy kattaa koko lämpökäsittelyssä käytettävä lämpötila-alue. /43/

Sammutuksen simulointi vaatii yksityiskohtaista tietoa myös lämmönsiirtokertoimesta sammutusväliaineen ja kappaleen pinnan välillä. Karkaistavan kappaleen pinnan lämpötila vaikuttaa huomattavasti lämmönsiirtymisen nopeuteen, joten lämmönsiirtymiskerroin ei ole vakio vaan se vaihtelee karkaisun edetessä. Höyrystyvillä sammutusnesteillä höyrykalvovaiheen, kiehumavaiheen ja konvektiovaiheen lämmönsiirto ovat hyvin erilaiset. Lämmönsiirtokertoimen suuruus vaihtelee myös samanlaisten sammutusväliaineiden välillä, kuten esimerkiksi eri öljyillä on erisuuret lämmönsiirtokertoimet. Lisäksi lämmönsiirtokertoimeen vaikuttaa sammutusväliaineen sekoitusnopeus, minkä takia sen suuruus vaihtelee eri sammutusaltaissa. /43/

Lämmönsiirtokertoimen tarkka määrittäminen onkin tärkeä vaihe simuloitaessa kappaleen jäähdytysnopeuksia. Sen määrittäminen on tavallisesti kaksivaiheinen prosessi. Ensin mittasondi tai termopareilla varustettu kappale karkaistaan ja sammutuksen yhteydessä esiintyvät lämpötilat mitataan ajan funktiona jäähdytyskäyrien määrittämiseksi. Saatujen jäähdytyskäyrien perusteella voidaan määrittää kappaleen ja sammutusväliaineen välinen lämmönsiirtokerroin. Lämmönsiirtokertoimen

määrittäminen tapahtuu numeerisesti laskemalla käsin tai sitä varten kehitetyn ohjelman avulla. /43/

Rajapinnan lämmönsiirtokerroin on määritetty yhtälöllä /14/

$$h = \frac{q}{A(T_1 - T_2)}, \quad (14)$$

jossa h = rajapinnan lämmönsiirtokerroin

q = lämpövirta kappaleesta sammutusväliaineeseen

A = kappaleen pinta-ala

T_1 = kappaleen pinnan lämpötila

T_2 = sammutusväliaineen lämpötila

Lämmönsiirtokerroin voidaan määrittää myös Grossmannin luvun avulla seuraavasti /14/

$$H = \frac{h}{2k}, \quad (15)$$

jossa H = Grossmannin luku

h = lämmönsiirtokerroin

k = materiaalin lämmönjohtavuus

6.3 Faasimuutosten simulointi

Jäähtymisen yhteydessä tapahtuvat faasimuutokset ovat joko diffuusion kontrolloimia aikariippuvaisia faasimuutoksia tai martensiittitransformaatio, joka on ajasta riippumaton. Muuttuneen martensiitin määrä f^{mart} saadaan määritettyä todellisen lämpötilan ja martensiitin muodostumisen alkamislämpötilan välisellä lämpötilaerolla sekä martensiitin maksimimäärän avulla f_{max}^{mart} . Kyseistä muutosta kuvataan Koistinen-Marburger yhtälöllä /46/

$$f^{mart} = f_{max}^{mart} (1 - \exp(-\gamma(M_s - T))) \quad (16)$$

Parametri γ on materiaaliin riippuvainen, mutta se vaihtelee vain vähän välillä 0,01...0,015. M_s -lämpötila riippuu jännityksestä, joka otetaan huomioon seuraavan kaavan avulla /46/

$$\Delta M_s = A\sigma_m + B\sigma' \quad (17)$$

jossa σ_m ilmaisee keskimääräisen jännityksen ja σ' puolestaan efektiivisen jännityksen.

Diffuusion kontrolloimaan faasimuutoksia ovat austeniitin hajaantuminen ferriitiksi, perliitiksi tai bainiitiksi. Kyseistä muutosta voidaan kuvata Avramin yhtälöllä /46/

$$f = f_{\max} \left(1 - \exp \left(- \left(\frac{t}{\tau} \right)^n \right) \right) \quad (18)$$

Edellä olevassa yhtälössä n , τ sekä transformoituneen faasin maksimimäärä ovat lämpötilariippuvaisia, joiden arvot on luettavissa isotermisistä transformaatiodiagrammeista. Jotta kyseistä mallia voidaan soveltaa jatkuvaan jäähtymiseen, hetkellisiksi faasiosuuksiksi oletetaan 10^{-8} faasimuutosten alkamislämpötilan alapuolella ja transformatioon kuluva aika jokaiselle faasille voidaan laskea kaavalla /46/

$$\frac{t}{\tau} = - \left(1 - \frac{f^{\text{phase}}}{f_{\max}^{\text{phase}}} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (19)$$

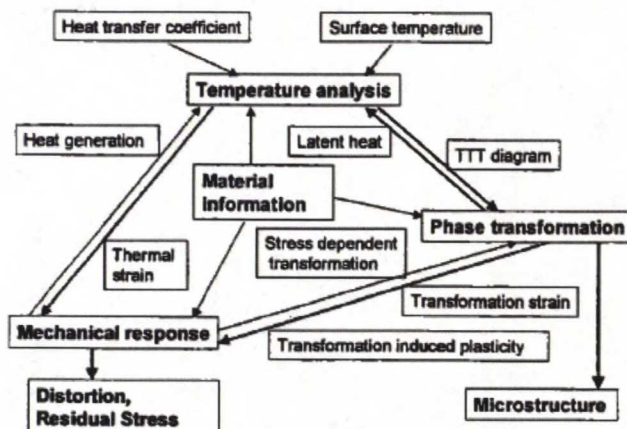
Faasimuutosten käyttäytymisen ennustamista vaikeuttavat lämpötila-aika diagrammit (jopa isotermiset faasimuutoskäyrät), jotka eroavat samalla teräksellä riippuen seosainevaihteluista, austenitointilämpötilasta sekä -ajasta. Etenkin ylieutektoidisilla teräksillä austenitoinnilla on suuri vaikutus M_s -lämpötilaan sekä diffuusion kontrolloiman transformaation inkubaatioaikaan. /46/

Faasidiagrammista on luettavissa teräksen tasapainokoostumukset tietyssä lämpötilassa. Aika tasapainonmukaisen koostumuksen saamiseksi saattaa kuitenkin olla paljon pidempi kuin austenitointiaika. Vaikka muutos ferriitistä austeniitiksi tapahtuukin nopeasti, vaatii sementtiin liukeneminen huomattavasti enemmän aikaa. /46/

Faasimuutoskäyttäytymiseen hehkutuksen ja sammutuksen yhteydessä vaikuttaa suuresti myös alkuperäisen teräksen tila. /46/

6.4 Mitta- ja muodonmuutosten simulointi

Muodonmuutokset sekä jäännösjännitykset syntyvät kappaleen lämpötilan sekä faasijakauman epätasaisuuden seurauksena. Kuvasta 32 on nähtävissä lämpökäsittelyn mitta- ja muodonmuutosten simuloinnissa huomioon otettavat tekijät.



Kuva 32 Mitta- ja muodonmuutosten simuloinnin vuokaavio /46/

Simuloinnin keskeisenä osana on materiaalidata kuten myös materiaalin käyttäytymistä kuvaavat termit. Termomekaaniset parametrit lämpötilahistorian sekä mekaanisten muutosten laskemiseksi täytyy antaa lämpötila- sekä koostumusriippuvaisessa muodossa jokaiselle faasille erikseen. Transformaatiokäyttäytyminen riippuu koostumuksesta, lämpötilasta sekä lämpötilanmuutosnopeudesta.

Mitta- ja muodonmuutosten sekä jäännösjännitysten ennustamisen on väitetty olevan termodynaamisella laskennalla tarkempaa kuin käytettäessä samankaltaisen teräksen faasimuutosdiagrammeja silloin, jos teräksen koostumus on tiedossa, mutta juuri tarkasteltavan teräksen faasimuutosdiagrammia ei ole saatavilla. Lisäksi karkaisun lopputulosta ei voida arvioida pelkän faasidiagrammin avulla, koska se riippuu myös karkaisuolosuhteista. Jäähtymisolosuhteiden vaikutus voidaan välttää käyttämällä isotermisiä diagrammeja. Isotermisten diagrammien käytössä on kuitenkin se, että austenitointiolosuhteet vaikuttavat suuresti kunkin teräslaadun isotermisiin diagrammeihin. Jo pienet muutokset teräksen koostumuksessa vaikuttavat suuresti transformaatiokäyttäytymiseen.

7 Kokeellisen osuuden työn tarkoitus

Työn kokeellisessa osassa keskitytään nopeaan sammutukseen, koska sitä käyttämällä pystytään siirtymään vähemmän seostettuihin ja siten halvempiin teräslaatuihin. Sammutusväliaineena on laimea suolavesiliuos. Itse prosessista selvitetään sen jäähdystysteho mitta-anturilla sekä mittaamalla kappaleiden todellisia jäähtymisnopeuksia. Käytössä oli vertailukelpoisia tuloksia teräslajista SFS EN 10083-1 34CrNiMo6, joten koemateriaaliksi valittiin standardin SFS EN 10083-1 mukainen 42CrMo4 -teräs halkaisijoilla 50...100 mm. Tavoitekovuustasoksi valittiin vähintään 45 HRC, eli karkaisun tulisi ulottua miltei läpi koko poikkipinnan. Teräs 42CrMo4 on nuikemmin seostettu ja siten myös halvempi raaka-aine kuin öljyyn karkaistava

34CrNiMo6 -teräs. Teräksen 42CrMo4 käyttö alentaisi tuotteiden materiaalikustannuksia noin 22 % /47/.

Koekappaleista selvitetään lujuus- ja sitkeysarvot sekä jäännösjännitykset. Lisäksi selvitetään kovuusjakauman riippuvuus kappaleen halkaisijasta ja sitä myötä jäähtymisnopeudesta, nopeutetulla sammutuksella saavutettavat jäännösjännitystilat sekä näiden vaikutus iskusitkeyteen. Mitta- ja muodonmuutosten hallitseminen nopeutetun sammutuksen yhteydessä on myös tarkastelun kohteena.

Osatavoitteena on selvittää voiko numeerista simulointia käyttää hyväksi lämpökäsittelyn tuotantosunnittelussa. Simulointi voidaan suorittaa 2D:nä, koska kyse on pyörähdysymmetrisistä kappaleista. Mikäli simulointia voidaan hyödyntää lämpökäsittelytulosten ennustamiseen, voitaisiin välttyä aikaa vieviltä ja kalliilta käytännön kokeilta.

8 Kokeet ja niiden suoritus

Koekappaleiden lämpökäsittelyt suoritettiin Bodycote Lämpökäsittely Oy, Pieksämäki. Simulointi tehtiin Teknillisessä korkeakoulussa Materiaalien muokkauksen ja lämpökäsittelyn laboratoriossa.

8.1 Koemateriaalit

Käytettävänä koemateriaalina oli 42CrMo4 -teräs. Tuloksia verrattiin öljyynsammutetulla 34CrNiMo6 -teräksellä /48/ sekä öljyynsammutetulla 42CrMo4 -teräksellä /48/ aiemmin saatuihin tuloksiin. Kyseiset teräkset ovat perinteisiä nuorrutusteräksiä. Taulukossa 7 on esitetty 42CrMo4 -teräksen kemialliset koostumukset käytetyillä sulatuksilla. Taulukossa 8 on 34CrNiMo6 -teräksen kemialliset koostumukset ja taulukossa 9 on 42CrMo4 -teräksen kemialliset koostumukset aiemmassa tutkimuksessa käytetyille koekappaleille.

Taulukko 7 42CrMo4 -teräksen sulatusanalyysit, tämä tutkimus

Ø [mm]	Sylinteri	Mitta Kpl	Sulatus no.	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]
50	x	x	51985	0,43	0,31	0,71	0,012	0,033	1,10	-	0,18
80	x	x	60082	0,41	0,29	0,74	0,010	0,032	1,09	0,18	0,17
100	x		60082	0,41	0,29	0,74	0,010	0,032	1,09	0,18	0,17
100		x	60412	0,41	0,28	0,76	0,016	0,034	1,10	0,23	0,17

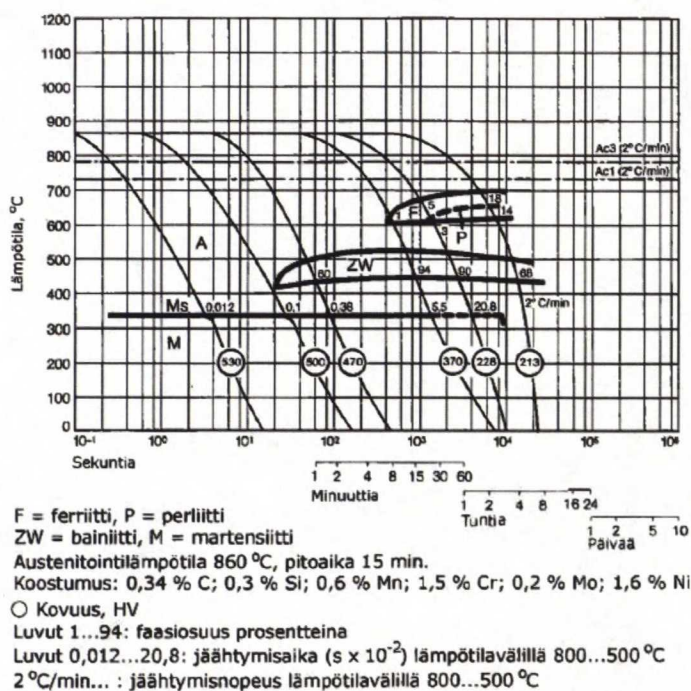
Taulukko 8 34CrNiMo6 -teräksen sulatusanalyysit, aiemmin tehty tutkimus /49/

Ø [mm]	Sulatus no.	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]	Al [%]	Cu [%]	N [%]
50	170130	0,33	0,20	0,63	0,014	0,001	1,66	0,28	1,61	0,035	0,13	0,0063
50	382350	0,35	0,21	0,55	0,015	0,006	1,51	0,20	1,48	0,014	0,19	0,0062
80	170130	0,33	0,20	0,63	0,014	0,001	1,66	0,28	1,61	0,035	0,13	0,0063
100	170130	0,33	0,20	0,63	0,014	0,001	1,66	0,28	1,61	0,035	0,13	0,0063

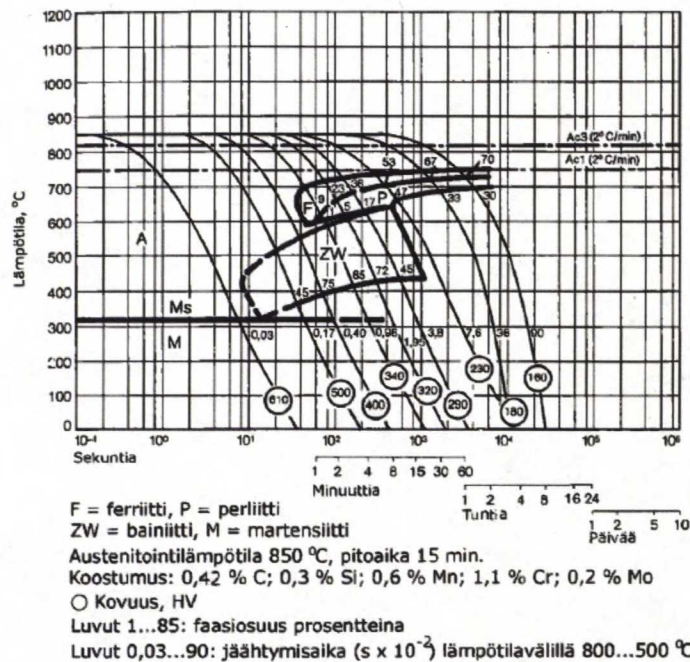
Taulukko 9 42CrMo4 -teräksen sulatusanalyysit, aiemmin tehty tutkimus /49/

Ø [mm]	Sulatus no.	C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ni [%]	Cu [%]	Mo [%]
40	57631A	0,43	0,6	0,32	0,024	0,013	1,1	0,17	0,15	0,17
50	57631A	0,43	0,6	0,32	0,024	0,013	1,1	0,17	0,15	0,17
70	57631A	0,43	0,6	0,32	0,024	0,013	1,1	0,17	0,15	0,17
80	57631A	0,43	0,6	0,32	0,024	0,013	1,1	0,17	0,15	0,17
100	57631A	0,43	0,6	0,32	0,024	0,013	1,1	0,17	0,15	0,17

Jatkuvan jäähtymisen käyrät kokeissa käytetyille teräksille ovat kuvissa 33 ja 34.



Kuva 33 34CrNiMo6 -teräksen jatkuvan jäähtymisen faasimuutoskäyrä /5/



Kuva 34 42CrMo4 -teräksen jatkuvan jäähtymisen faasimuutoskäyrä /5/

8.2 Koekappaleet

Koekappaleet olivat halkaisijaltaan 50 mm, 80 mm ja 100 mm olevia tankoja. Jokaiselle halkaisijalle oli kolmenlaisia koekappaleita. Ensimmäisiä käytettiin todellisten jäähtymisnopeuksien mittaukseen, toisia mekaanisten ominaisuuksien tarkasteluun ja kolmansia mitta- ja muodonmuutosten tarkasteluun.

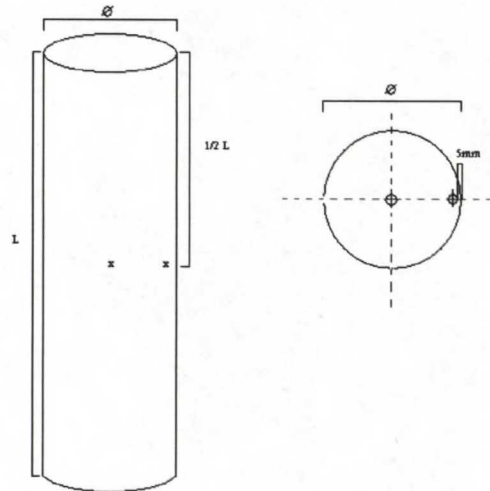
Koekappaleiden mitat ja lukumäärät tehtäviä lämpökäsittelyjä varten todellisten jäähtymisnopeuksien tarkastelemiseksi on taulukossa 10. Koekappaleiden pituus oli vähintään neljä kertaa halkaisija, jottei lämmönjohtuminen kappaleen päätypinnoista vaikuta mitattaviin jäähtymisnopeuksiin.

Taulukko 10 Koekappaleet todellisten jäähtymisnopeuksien mittaamiseksi

	Ø [mm]	Pituus [mm]	Määrä [kpl]
	50	200	2
	80	350	2
	100	400	2
Yhteensä			6

Jokaiseen koekappaleeseen porattiin kaksi pituussuuntaista reikää termoelementtejä varten, toinen keskelle kappaletta ja toinen pinnan lähelle kuvan 35 mukaisesti. Lähelle pintaa oleva reikä porattiin siten, että reiän reunan ja kappaleen pinnan välinen etäisyys oli noin 5 mm. Reikien pituudet olivat noin puolet kunkin kappaleen pituudesta.

Molempien reikien halkaisijat kussakin kappaleessa, paria viimeistä senttiä lukuun ottamatta, olivat 5 mm. Loppuosan halkaisija toisessa koekappaleessa oli 2,0 mm ja toisessa 3,5 mm. Käytettävien termoelementtien halkaisijat olivat 1,5 mm ja 3,0 mm. Koekappaleita jäähtymisnopeuksien mittaamista varten oli kahdenlaisia, koska ei tiedetty kumpi termoelementin halkaisija sopii mittauksiin paremmin. Molempien kappaleiden työstäminen sekä käyttö onnistui, eikä mittauksissa havaittu eroja. Kuvassa 35 on hahmotelma jäähtymisnopeuksien mittausta varten työstetyistä koekappaleista. Merkki X kertoo termoelementtien sijoituspaikan koekappaleen pituussuunnassa.



Kuva 35 Hahmotelma koekappaleesta jäähtymisnopeuksien mittauksissa.

Koekappaleiden mitat ja lukumäärät mekaanisten ominaisuuksien tarkastelemiseksi on taulukossa 12. Koekappaleiden pituus oli vähintään neljä kertaa halkaisija, jottei lämmönjohtuminen kappaleen päätynnoista vaikuta saataviin lopputuloksiin.

Taulukko 11 Koekappaleet mekaanisten ominaisuuksien tarkastelua varten

	Ø [mm]	Pituus [mm]	Määrä [kpl]
	50	200	8
	80	350	8
	100	400	8
Yhteensä			24

Koekappaleet mekaanisten ominaisuuksien tarkastelemiseksi olivat sylinterinmallisia eikä niihin ole työstetty mitään muotoja. Koekappaleet olivat muuten samanlaisia kuin jäähtymisnopeuksien tarkastelua varten työstetyt, mutta niissä ei ollut reikiä termoelementtejä varten.

Nopeutetussa sammutuksessa syntyvien mitta- ja muodonmuutosten tarkastelua varten työstettiin 42CrMo4 -teräksestä kullekin halkaisijalle taulukon 13 mukaiset kappaleet. Halkaisijat 84 ja 106 mm valittiin käytännön syistä lähemmäksi todellisia osia.

Taulukko 12 Koekappaleet mitta- ja muodonmuutosten tarkastelua varten

	Ø [mm]	Pituus [mm]	Määrä [kpl]
	50	530	4
	84	840	4
	106	1050	4
Yhteensä			12

8.3 Lämpökäsittelyt

Koekarkaisut suoritettiin Pieksämäellä Bodycote Lämpökäsittely Oy:n tiloissa. Koekappaleista tehtiin yhteensä neljä panosta, joista kaksi sammutettiin kerralla kylmäksi ja kahdelle suoritettiin keskeytetty sammutus. Panokset on esitetty taulukossa 14. Kappaleet 1 olivat mekaanisten ominaisuuksien mittausta varten, kappaleet 2 todellisten jäähtymisnopeuksien mittaamista varten ja kappaleet 3 mitta- ja muodonmuutosten tarkastelua varten.

Taulukko 13 Pieksämäellä karkaistut panokset

Panos no.	Sammutus	Ø [mm]	Päästö 200 °C [lkm]	Ei päästöä [lkm]	Kpl 1 [lkm]	Kpl 2 [lkm]	Kpl 3 [lkm]
1	kerralla	50	4	3	4	1	2
2	kerralla	80/100	4/4	3/3	4/4	1/1	2/2
3	keskeytetty	50	4	3	4	1	2
4	keskeytetty	80/100	4/4	3/3	4/4	1/1	2/2

Austenitointi suoritettiin suojakaasussa samalla tavalla molempiin eri sammutusmenetelmiin, taulukko 15. Pitoajalla tarkoitetaan aikaa, joka panos pidettiin uunin täydessä lämpötilassa.

Taulukko 14 Koepanosten austenitointi

Ø [mm]	T [°C]	Pitoaika [min]
≤110	850	90

Austenitointi-kehkuksen jälkeen panokset 1, ja 2 sammutettiin kerralla kylmäksi ja panoksille 3 ja 4 suoritettiin keskeytetty sammutus nostamalla panokset pois sammutusväliaineesta kappaleen keskustan lämpötilan ollessa noin 400 °C. Sammutuksen keskeytyksen jälkeen kappaleet saivat jäähtyä loppuun vapaasti huoneenlämpötilassa.

Käytetyn suolavesiliuoksen suolapitoisuus oli noin 11,5 %. Karkaisulisäaineena oli soodapohjainen Aquarapid F. Sammutusaltaassa oli kolme potkurisekoitinta, jotka pyörivät täydellä teholla sammutuksen ajan.

Sammutuksen jälkeen osa kappaleista päästettiin 200 °C:ssa ja osa jätettiin päästämättä, jotta päästön vaikutuksia voitiin tutkia.

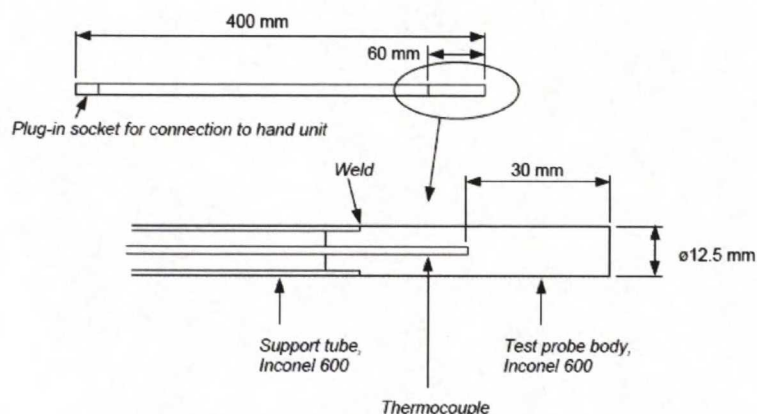
8.4 Suoritetut mittaukset ja kokeet

Työssä mitattiin sammutusaltaan jäähdytysteho, koekappaleiden todellinen jäähtymisnopeus, koekappaleiden pintakovuus ja kovuusjakauma, jäännösjännitys jakauma, iskusitkeys, mitta- ja muodonmuutokset sekä tutkittiin mikrorakenne optisella mikroskoopilla. Liitteessä 1 on koesuunnitelma, josta on nähtävissä koekappaleille tehty lämpökäsittelyt ja kokeet.

8.4.1 Sammutusaltaan jäähdytystehon mittaus

Sammutusaltaan jäähdytysteho mitattiin IVF-SmartQuench -laitteella suoraan sammutusaltaasta. Laite soveltuu standardin ISO 9950:1995, "Industrial quenching oils –Determination of cooling characteristics- Nickel-alloy probe test method" mukaisesti määrittelyyn. Laitteessa on halkaisijaltaan 12 mm oleva Inconel 600:sta valmistettu mitta-anturi, jonka keskellä on halkaisijaltaan 1,5 mm oleva K-tyypin termoelementti. /49/

Kuvassa 36 on esitetty laboratorioastiassa suoritettavissa mittauksissa käytettävän mitta-anturin rakenne.



Kuva 36 SmartQuench -laitteen mitta-anturi /49/

Suoraan sammutusaltaasta mitattaessa käytettiin pituudeltaan 1500 mm olevaa mitta-anturia, jonka mittapään rakenne vastaa kuvassa 36 olevaa anturia.

Itse mittaus tapahtui lämmittämällä mitta-anturi ensin lämpötilaan 855 °C ja siirtämällä se sen jälkeen sammutusväliaineeseen. Suolavesiliuokselle mittausajaksi asetettiin 20 sekuntia. Tulokset kerättiin tietokoneelle ja piirrettiin mitatut lämpötilat ajan sekä jäähtymisnopeuden funktiona. Ohjelma laskee lisäksi automaattisesti kullekin mittaukselle muun muassa maksimi jäähtymisnopeuden, jäähtymisnopeudet lämpötilassa 300 °C ja 550 °C, kuinka kauan kestää saavuttaa lämpötilat 600 °C, 400 °C ja 200 °C sekä lämpötilat, joissa höyrykalvovaihe muuttuu kiehumtavaiheeksi ja kiehumtavaihe

konvektiovaiheeksi. Mittaus suoritettiin kolme kertaa yhdelle sammutusväliaineelle tulosten luotettavuuden varmistamiseksi.

8.4.2 Todellisten jäähtymisnopeuksien mittaus koekappaleista

Jäähtymisnopeudet mitattiin koekappaleista kahdella termoelementillä. Toinen termoelementti sijoitettiin kappaleen keskustaana ja toinen pinnan lähelle, kuva 35 ja 37. Näin voitiin tarkasteltua sitä, kuinka suuri ero jäähtymisnopeuksissa kappaleen pinnan ja keskustan välillä on. Kappaleen pituussuunnassa termoelementit olivat kappaleen puolessavälissä. Panokseen termoelementillä varustetut kappaleet asetettiin siten, että termoelementtireiät olivat alaspäin.



Kuva 37 Termoelementtien asettelu koekappaleeseen

Termoelementit olivat K-tyypin vaippatermoelementtejä. Termoelementit on valmistettu Inconel 600:sta ja kompensatiokaapeli silikonista. Inconel 600:sta valmistettu K-tyypin termoelementti kestää aina lämpötilaan 1100 °C asti /50/. Koekappaleissa, joissa termoelementtireikien halkaisija oli 3,5 mm, termoelementtien halkaisija oli 3 mm, pituus 5 m ja kompensatiokaapelin pituus samoin 5 m. Toisissa koekappaleissa termoelementtien halkaisija oli 1,5 mm, pituus 10 m ja kompensatiokaapelin pituus 1 m.

Lämpötilamittauksissa käytettiin monikanavaista Personal Daq 3000 -mittalaitetta, kuva 38.



Kuva 38 Personal Daq 3000 – mittalaite

Mittaus tapahtui kytkemällä termoelementit mittalaitteeseen ja mittalaite tietokoneeseen. Tehdyissä mittauksissa mittalaite kytkettiin päälle kunkin panoksen austenitoinnin

aikana ja annettiin olla päällä aina sammutuksen loppuun saakka. Käytetty mittaustiheys oli 1 mittaus/sekunti. Mittaustulosten heiluntaa ehkäistiin valitsemalla ”Oversample” arvoksi 16384. Tämä tarkoittaa sitä, että itse mittalaite ottaa kyseisen määrän signaaleja ja laskee niistä keskiarvon, jonka se lähettää tietokoneelle kerran sekunnissa, kun mittaustiheys on 1 mittaus/sekunti.

Ensin kullekin panokselle mitattiin jäähtymiskäyrät sammutuksessa kerralla kylmäksi. Saatujen käyrien avulla arvioitiin sammutuksen keskeytyksen ajankohta keskeytetyssä sammutuksessa. Keskeytys pyrittiin suorittamaan ajanhetkellä, jolloin keskustan lämpötila olisi noin 400 °C. Intensiivisen sammutuksen patentissa /51/ keskeytyksen ajankohdaksi ilmoitetaan lämpötilaväli 400...450 °C.

8.4.3 Pintakovuus ja kovuusjakauma

Karkaisun jälkeiset pintakovuudet mitattiin kaikista muista koekappaleista paitsi niistä, joita käytettiin todellisten jäähtymisnopeuksien mittaamiseen. Pintakovuudet mitattiin koekappaleiden puolivälistä. Ennen kovuuden mittausta koekappaleiden pinnasta poistettiin hiomalla mittauskohdasta oksidikerros. Tämän jälkeen koekappaleet nostettiin digitaaliselle Ernst-merkkiselle HRC -kovuusmittarille. Mittaus toistettiin jokaiselle koekappaleelle kolme kertaa. Saaduista tuloksista laskettiin keskiarvo kappaleiden pintakovuudelle.

HRC on Rockwellin kovuuskoe asteikon C mukaisesti. Kyseisessä kovuuskokeessa timanttikartiota painetaan kahdessa eri vaiheessa tietyllä kuormalla koekappaletta vasten. Ensimmäisen vaiheen kuorma on 98,7 N ja toisen vaiheen kuorma 1373 N. Kovuustulos saadaan edellä mainittujen kuormien aiheuttamasta pysyvästä painauman syvyyden muutoksesta kaavalla

$$HRC = 100 - \frac{h}{0,002}, \quad (20)$$

jossa h on painauman syvyyden pysyvä lisäys esivoiman vaikutuksessa, mutta lisävoima poistettuna. /52/

Kovuusjakauma mitattiin kustakin halkaisijasta neljästä kappaleesta (keskeytetty sammutus + päästö 200 °C, keskeytetty sammutus + ei päästöä, sammutus kerralla + päästö 200 °C ja sammutus kerralla + ei päästöä). Kappaleiden puolivälistä leikattiin märkäleikkurilla noin sentin paksuinen siivu, josta kovuusjakauma mitattiin niin ikään HRC yksikkönä. Ennen kovuusmittausta leikatut siivut hiottiin epätasaisuuksien poistamiseksi. Kovuusjakauma mitattiin kustakin kappaleesta kappaleen reunasta keskustaan neljästä kohtaa. Mittaus tehtiin 20 mm asti 5 mm välein, minkä jälkeen 10 mm välein keskustaan saakka.

8.4.4 Jäännösjännitys jakauma

Jäännösjännitys jakauma mitattiin päästetyistä kappaleista kullekin halkaisijalle molemmilla sammutustavoilla. Koekappaleisiin työstettiin jyrsimällä neljä lovea, joiden syvyydet olivat noin 1, 2, 5 ja 10 millimetriä. Lovet sijaitsivat kappaleiden pituussuunnan keskikohdassa eri puolella sylinterin kehää. Lovetut kappaleet lähetettiin Stresstech Oy:lle Vaajakoskelle, jossa niistä mitattiin jokaiselle halkaisijalle jäännösjännitykset pinnasta sekä edellä mainituista jyrsimäsyvyyksistä. Lisäksi halkaisijasta 50 mm mitattiin muutama tulos kappaleen pinnan ja 1 mm väliltä.

Ennen kuin Stresstech pystyi suorittamaan jäännösjännitysmittaukset röntgendiffraktometrillä, täytyi heidän poistaa jokaisesta mittauskohdasta ohut kerros materiaalia sähkökemiallisella kiillotuksella, jotta lovien työstön yhteydessä syntyneet jännitykset saatiin eliminoidua. Kuvassa 39 on nähtävissä käytetty mittausmenetelmä sekä malli yhdestä työstetystä lovesta.

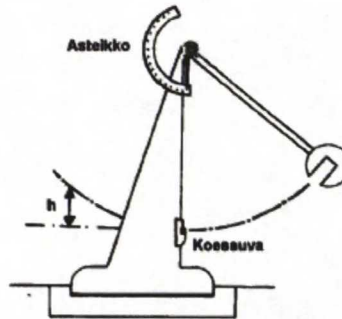


Kuva 39 Jäännösjännitysmittaus, Stresstech Oy /53/

8.4.5 Iskusiitekeys

Iskusiitekeys mitattiin halkaisijasta 80 mm kahdelle kappaleelle (keskeytetty sammutus + päästö ja sammutus kerralla + päästö). Koemenetelmänä oli standardin SFS-EN 10 045-1 mukainen Charpy-V koe.

Charpy-V kokeessa molemmista päistä tuettua keskeltä v-lovettua sauvaa isketään kerran iskuheilurilla. Iskussa kulunut energia eli iskutyö määritetään jouleina. Käytettävän iskuvasaran iskuenergia on määrätty. Koesauvan murtumiseen vaadittava voima mitataan jouleina sen perusteella miten korkealle heiluri nousee koesauvan rikkoontumisen jälkeen. Charpy-V sauvan mitat ovat 10 x 10 x 55 mm ja sen yhden pitkän sivun keskelle työstetyn v-mallisen loven syvyys on 2 mm, kulma 45° ja pohjan pyöristyssäde 0,25 mm. Kuvassa 40 on malli Charpy-V kokeessa käytettävästä iskuvasarasta. /54/

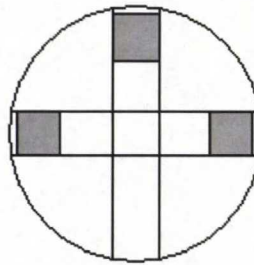


40 Charpy-V kokeessa käytettävä iskuvasara /5/

Iskusitkeys-kokeessa koesauvojen lämpötila oli 20 °C.

Koesauvojen työstäminen aloitettiin Lahdessa leikkaamalla molemmista kappaleista noin 60 mm paksuiset palat. Paloista leikattiin hieman standardissa määritettyä Charpy-V koesauvaa suuremmat sauvat kappaleen pinnan läheltä. Mittojen viimeistely standardissa määritettyihin mittoihin suoritettiin hiomalla. Iskusitkeys-kokeet teetettiin Metlab Oy:llä Tampereella, joka myös työsti koesauvoihin lovet. Lovi työstettiin kappaleen sille pinnalle, joka oli lähimpänä alkuperäisen kappaleen pintaa.

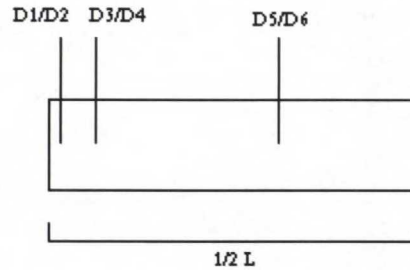
Kuvassa 41 on esitetty iskusauvojen ottokohdat 80 mm halkaisijaltaan olevista koekappaleista.



Kuva 41 Iskusauvojen paikat koekappaleissa Ø80 mm

8.4.6 Mitta- ja muodonmuutosten määrittäminen

Pieksämäellä karkaistuista kappaleista mitta- ja muodonmuutokset mitattiin ottamalla ristimittoja mikrometrillä kappaleiden halkaisijoilta useasta kohtaa ennen karkaisua. Mittaukset toistettiin samoista kohdista karkaisun jälkeen ja saatuja tuloksia verrattiin keskenään. Kuvassa 42 on esitetty halkaisijoiden mittauskohdat.



Kuva 42 Halkaisijoiden mittauskohdat. Jokaisesta kohtaa on otettu ristimitta. Mittaukset suoritettiin koekappaleen molemmista päistä.

Halkaisijoiden lisäksi karkaisun jälkeen mitattiin kuinka paljon kappaleen päädyt ovat painuneet kuopalle.

Kaikki mittaukset toistettiin kolme kertaa.

Koekappaleiden suoruuksia ei mitattu, koska koekarkaisussa panokset olivat vajaita, minkä seurauksena tulokset eivät olisi olleet todellisia.

8.4.7 Mikrorakennetarkastelu

Mikrorakennetta tarkasteltiin halkaisijaltaan 50 ja 100 mm olevista kappaleista, jotka oli sammutettu käyttämällä keskeytettyä sammutusta ja päästetty tämän jälkeen lämpötilassa 200 °C. Kummastakin kappaleesta tehtiin kaksi mikrorakennehieettä. Toinen hie otettiin aivan kappaleen pinnasta ja toinen kohdasta, jossa kovuus oli saadun kovuusjakauman mukaan alhaisimmillaan. Taulukossa 16 on hieiden ottokohdat kappaleista.

Taulukko 15 Mikrorakennehieiden ottokohdat

Ø [mm]	hie 1	hie 2 [mm] (etäisyys pinnasta)
50	pinta	20
100	pinta	40

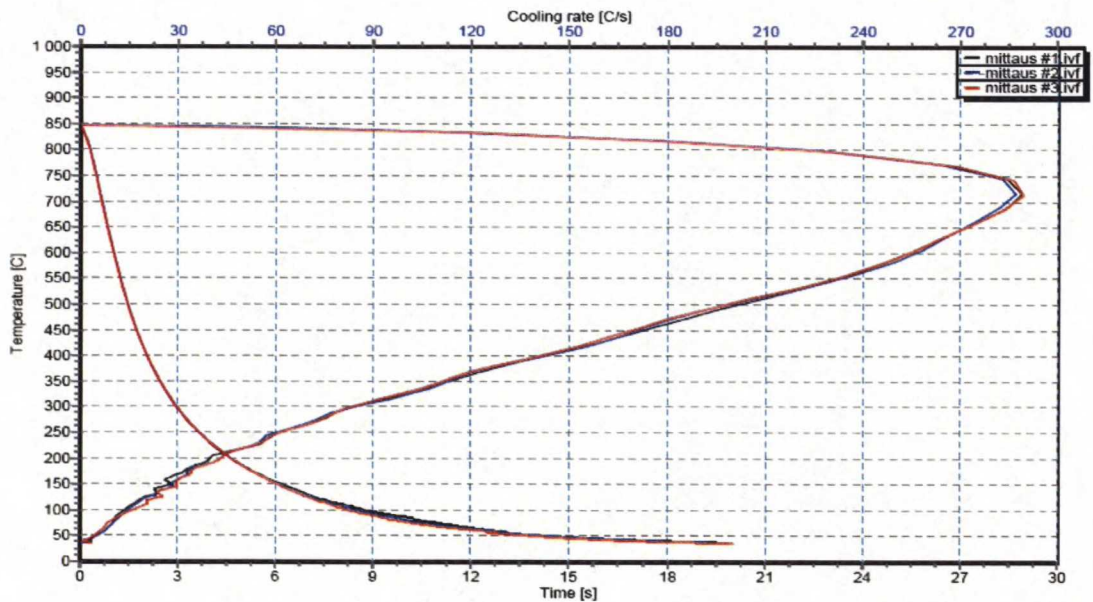
Hieet valmistettiin kovuusjakaumaa varten leikatusta kiekosta nappeihin siten, että kuhunkin nappiin tuli yhden kappaleen hieet. Hieiden koot olivat noin 3 mm x 5 mm. Hieet hiottiin ja kiillotettiin, minkä jälkeen ne syövytettiin nitalilla mikrorakenteen esiin saamiseksi. Syövytyksen jälkeen mikrorakennetta tarkasteltiin digitaalisella kameralla varustetulla optisella mikroskoopilla. Tehtyjen hieiden perusteella oli tarkoitus selvittää kappaleiden mikrorakennetta yhdessä kovuusjakaumien ja jatkuvan jäähtymisen käyrien kanssa.

9 Koetulokset

Seuraavassa käydään läpi Pieksämäellä Bodycote Lämpökäsittely Oy:n tiloissa karkaistujen koekappaleiden tulokset. Esitettäviä tuloksia ovat sammutusaltaan jäähdytysteho, koekappaleiden jäähtymisnopeudet sekä karkaistujen kappaleiden mekaaniset ominaisuudet ja mikrorakenteet.

9.1 Sammutusaltaan jäähdytysteho

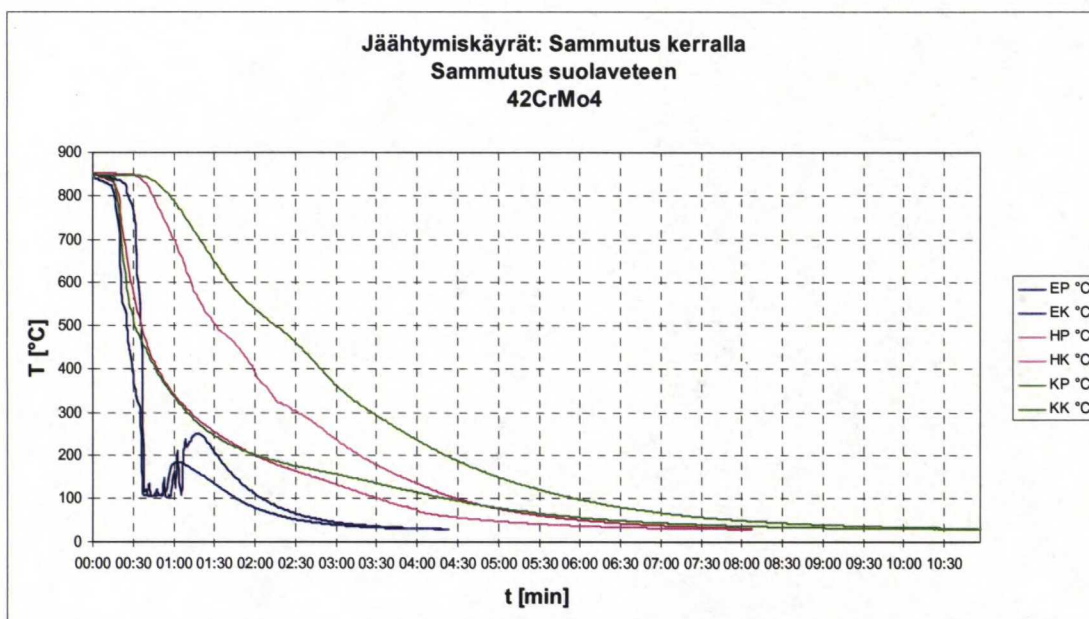
Sammutusaltaan jäähdytysteho mitattiin suoraan sammutusaltaasta sekoituksen ollessa täysillä. Sammutusveden lämpötila oli 29 °C ja suolapitoisuus noin 11,5 % Mittaustuloksena saatiin kuvan 43 mukainen käyrä.



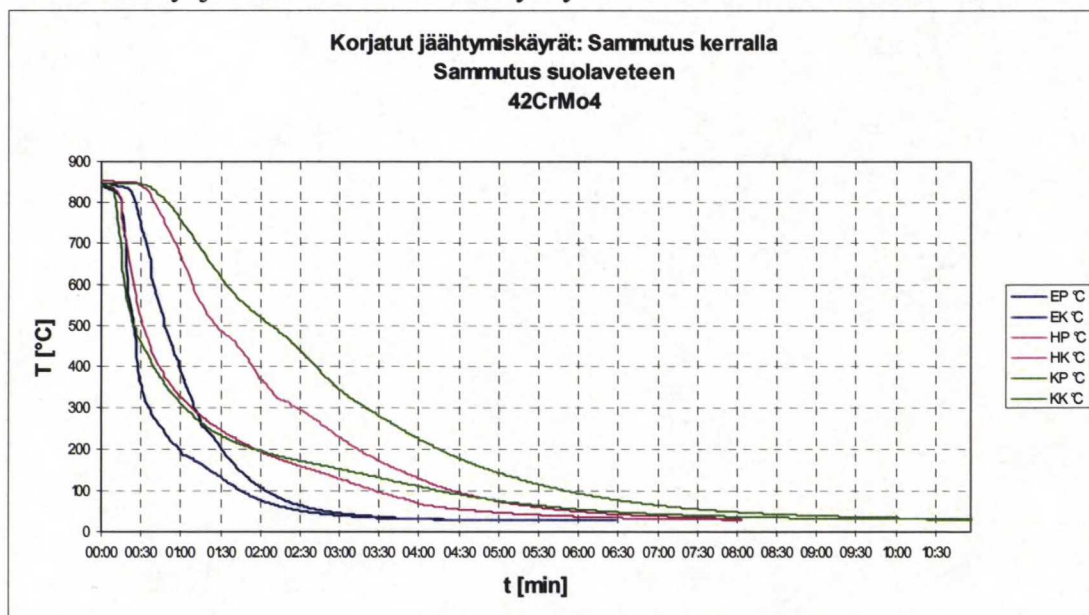
Kuva 43 IVF SmartQuench -laitteella mitattu jäähtymis- ja jäähtymisnopeuskäyrä: suolavesiliuos 11,5 %/29 °C, Pieksämäki

9.2 Koekappaleiden todelliset jäähtymisnopeudet

Koekappaleiden jäähtymisnopeudet mitattiin kullekin halkaisijalle keskeytetyssä sammutuksessa ja sammutuksessa kerralla kylmäksi. Kuvassa 44 on esitetty saadut jäähtymiskäyrät sammutuksessa kerralla kylmäksi.



Kuvan käyrissä EP ja EK on selviä mittausvirheitä. Kuvassa 45 on vastaavat jäähtymiskäyrät, joista nämä virheet on eliminoitu poistamalla tuloksista aikaväli, jolla virheitä esiintyi ja lisäämällä tilalle keskeytetyn sammutuksen tuloksia tältä aikaväliltä.



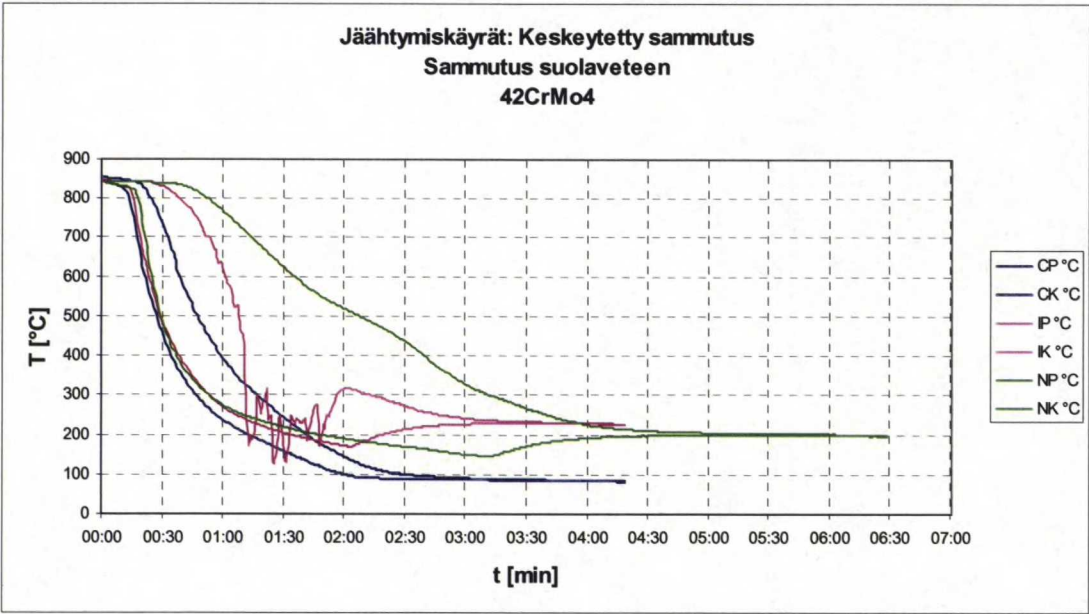
Kuvassa 45 olevista jäähtymiskäyristä arvioitiin keskeytetyn sammutuksen keskeytyksen ajankohdat kullekin halkaisijalle. Saadut aika-arviot ovat taulukossa 17. Samasta taulukosta selviää Kuvien 44 ja 45 käyrien merkintöjen selitykset.

Taulukko 16 Keskeytetyn sammutuksen keskeytyksen ajankohdat

Käyrä	Kappaleen Ø [mm]	Termoelementin sijainti	Termoelementin Ø [mm]	Sammutuksen keskeytys t [min]
EK	50	Keskusta	1,5	1:00
EP	50	Pinta	1,5	
HK	80	Keskusta	3,0	2:00
HP	80	Pinta	3,0	
KK	100	Keskusta	3,0	2:45
KP	100	Pinta	3,0	

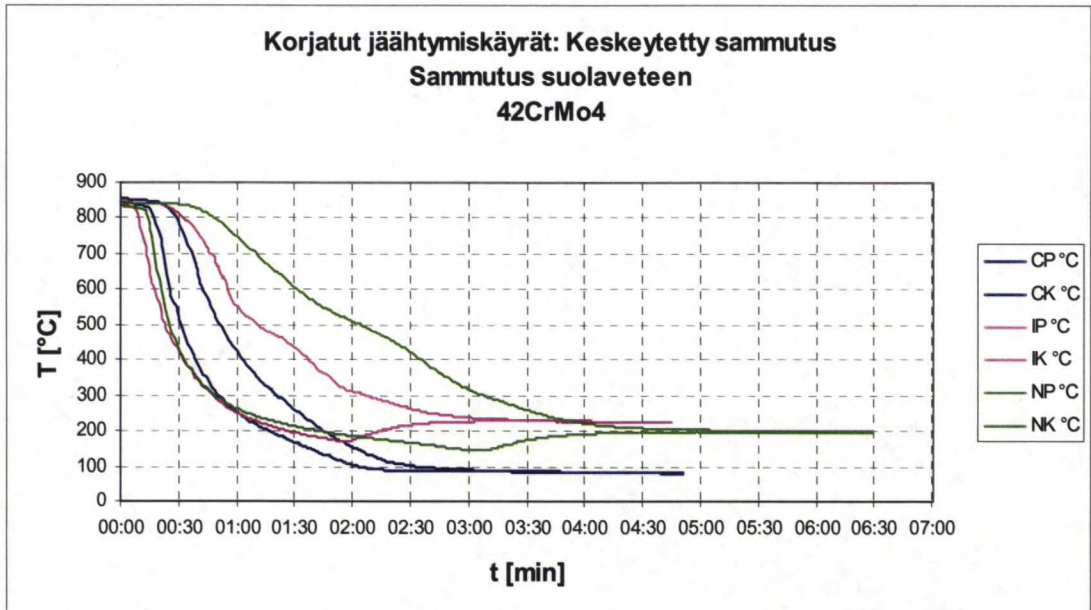
Todellisessa tuotannossa sammutuksen keskeytyksen ajankohdat voidaan mitata korkeintaan puolen minuutin tarkkuudella.

Kuvassa 46 on esitetty saadut jäähtymiskäyrät kullekin halkaisijalle keskeytetyssä sammutuksessa.



Kuva 46 Kappaleiden jäähtymiskäyrät: keskeytetty sammutus
CP=Ø50 pinta, CK= Ø50 keskusta
IP= Ø80 pinta, IK= Ø80 keskusta
NP= Ø100 pinta, NK= Ø100 keskusta

Käyrässä IK on selviä mittausvirheitä, jotka on eliminoitu kuvassa 47. Tämä tapahtui poistamalla tuloksista aikaväli, jolla virheitä esiintyi ja lisäämällä tilalle kerralla sammutetulle kappaleelle saatuja tuloksia tältä aikaväliltä.



Kuva 47 Kappaleiden korjatut jäähymiskäyrät: keskeytetty sammutus
 CP=Ø50 pinta, CK= Ø50 keskusta
 IP= Ø80 pinta, IK= Ø80 keskusta
 NP= Ø100 pinta, NK= Ø100 keskusta

Taulukossa 18 on nähtävissä mitä kuvien 46 ja 47 käyrien merkinnät tarkoittavat sekä se, mihin lämpötilaan kappaleiden lämpötila tasaantui ja kuinka kauan lämpötilan tasaantuminen kesti keskeytetyssä sammutuksessa.

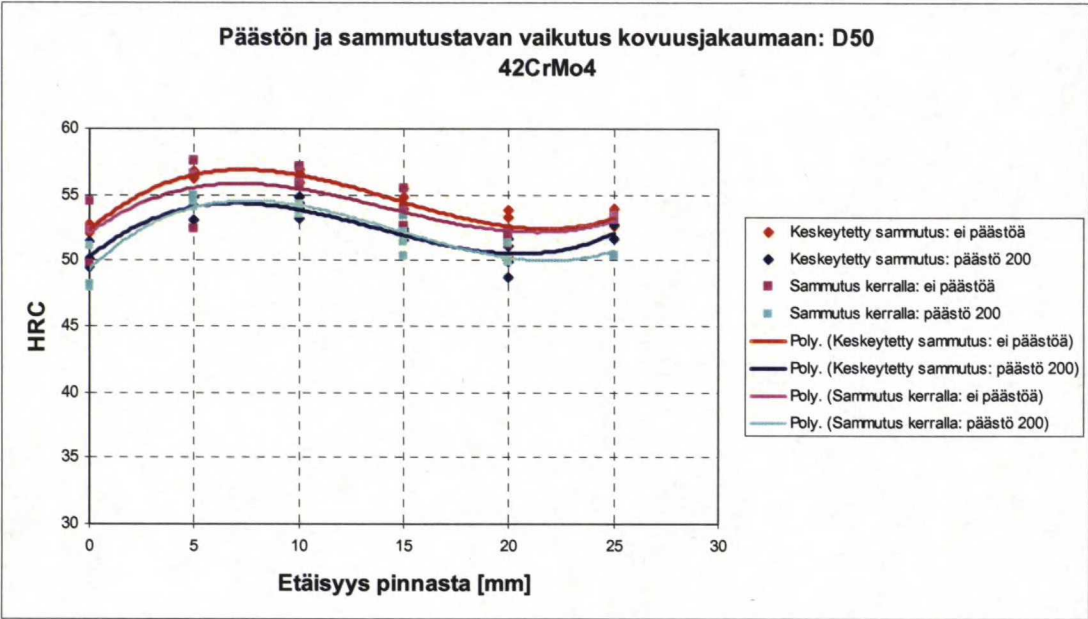
Taulukko 17 Lämpötilat, joihin kappaleet tasaantuivat sammutuksen keskeytyksen jälkeen

Käyrä	Kappaleen Ø [mm]	Termoelementin sijainti	Termoelementin Ø [mm]	Tasaantunut lämpötila T [°C]	Lämpötilan tasaantumisen kesto [min]
CK	50	Keskusta	3,0	90	Ei voida määrittää
CP	50	Pinta	3,0		
IK	80	Keskusta	1,5	230	1:30
IP	80	Pinta	1,5		
NK	100	Keskusta	1,5	200	2:00
NP	100	Pinta	1,5		

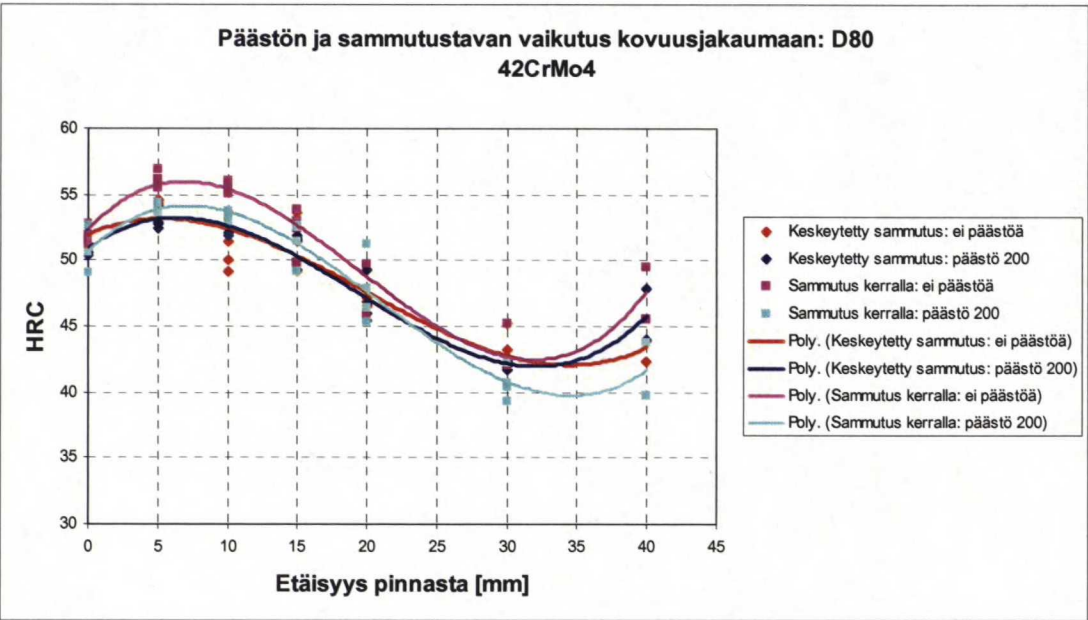
9.3 Pintakovuus ja kovuusjakauma

Pintakovuuksille ja kovuusjakaumille saatuja tuloksia esitetään seuraavassa usealla tavalla. Ensin ovat kuvaajat, joissa näkyy sammutustavan ja päästön vaikutus Pieksämäellä karkaistujen 42CrMo4 -teräksestä valmistettujen koekappaleiden kovuuksiin suolavesikarkaisussa, kuvat 48...50. Kuvaajissa näkyvät eri

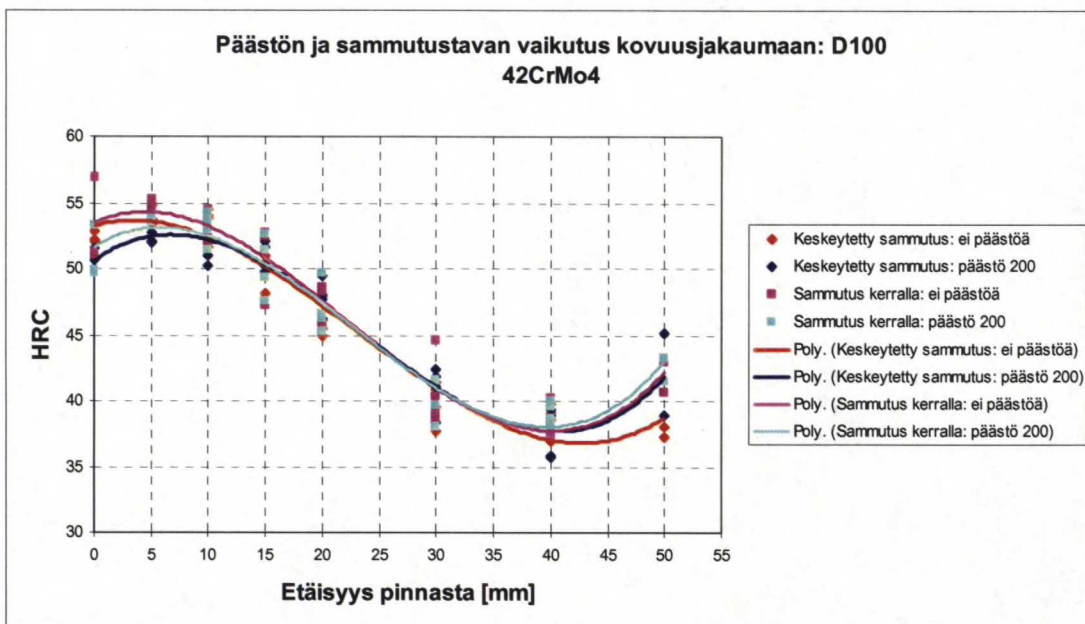
lämpökäsittelymenetelmille kaikki mittauspisteet sekä niihin sovitettu polynominen trendikäyrä.



Kuva 48 Päästön ja sammutustavan vaikutus halkaisijaltaan 50 mm olevan kappaleen kovuusjakaumaan

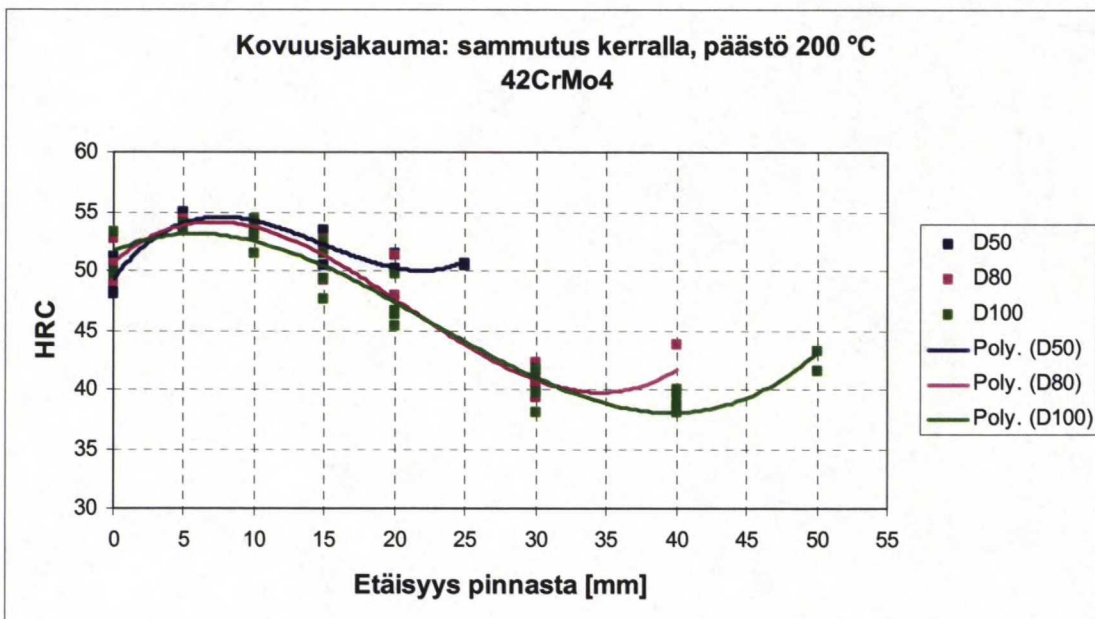


Kuva 49 Päästön ja sammutustavan vaikutus halkaisijaltaan 80 mm olevan kappaleen kovuusjakaumaan



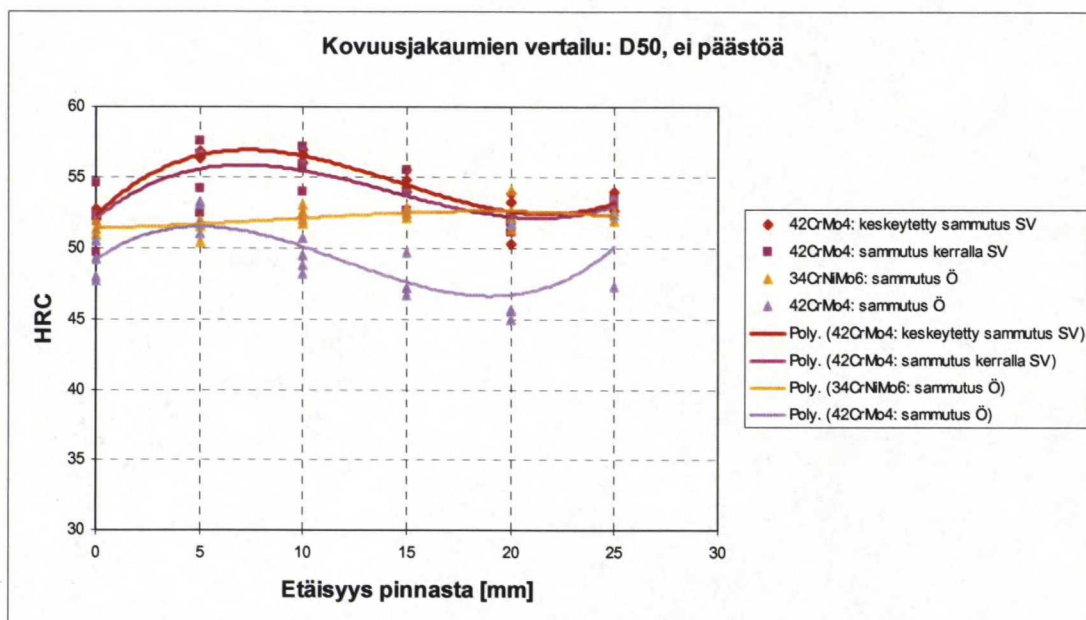
Kuva 50 Päästön ja sammutustavan vaikutus halkaisijaltaan 100 mm olevan kappaleen kovuusjakaumaan

Seuraavassa on kuvaaja, josta näkyy kappaleen halkaisijan vaikutus karkaistujen koekappaleiden kovuusjakaumaan, kuva 51. Tässä esitetään vain yksi tapaus (sammutus kerralla + päästö 200 °C), koska sammutustavalla ja päästöllä lämpötilassa 200 °C ei ollut suurta vaikutusta saatuihin tuloksiin. Kuvaajassa näkyy kaikki mittauspisteet kullekin halkaisijalle sekä niihin sovitettu polynominen trendikäyrä.

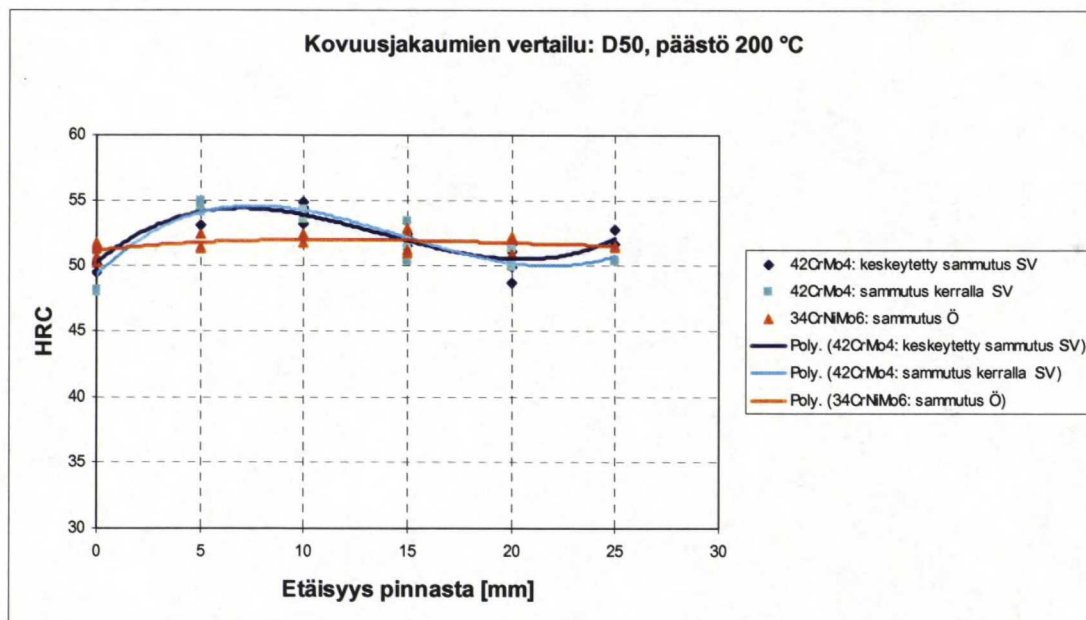


Kuva 51 Halkaisijan vaikutus kovuusjakaumaan, sammutus kerralla, päästö 200 °C

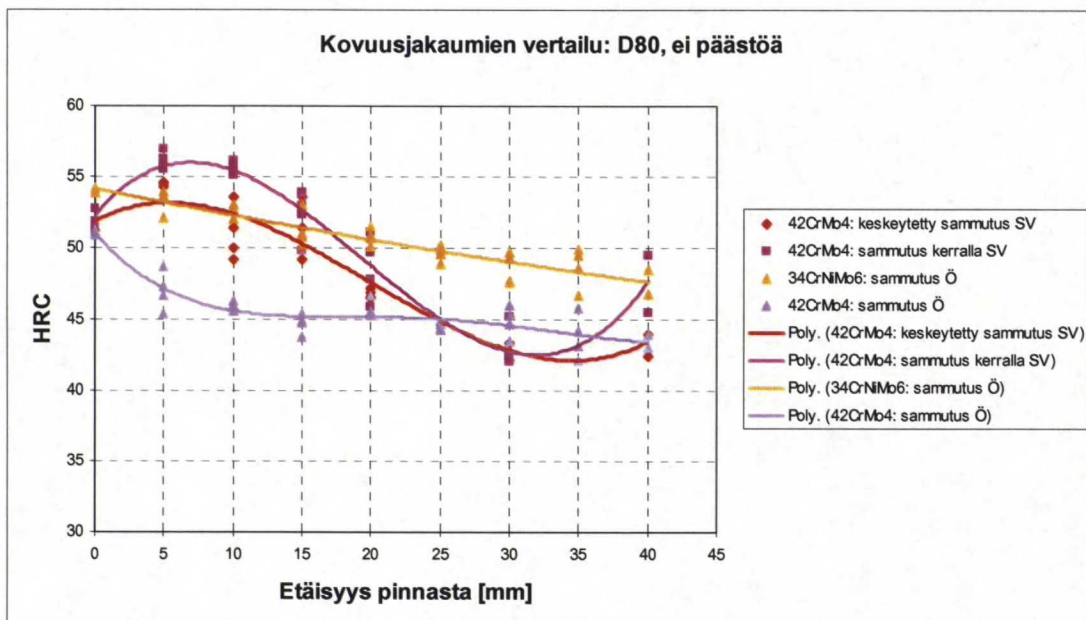
Viimeiseksi on esitetty suolavesikarkaistun 42CrMo4 -teräksen kovuuksia verrattuna aiemmin mitattuihin öljysammutettujen 42CrMo4 sekä 34CrNiMo6 -terästen kovuuksiin halkaisijoilla 50, 80 ja 100 millimetriä, kuvat 52...56. Kuvaajissa on nähtävissä kaikki mittauspisteet kullekin teräslaatu-lämpökäsittelymenetelmä -yhdistelmälle sekä niihin sovitettu polynominen trendikäyrä.



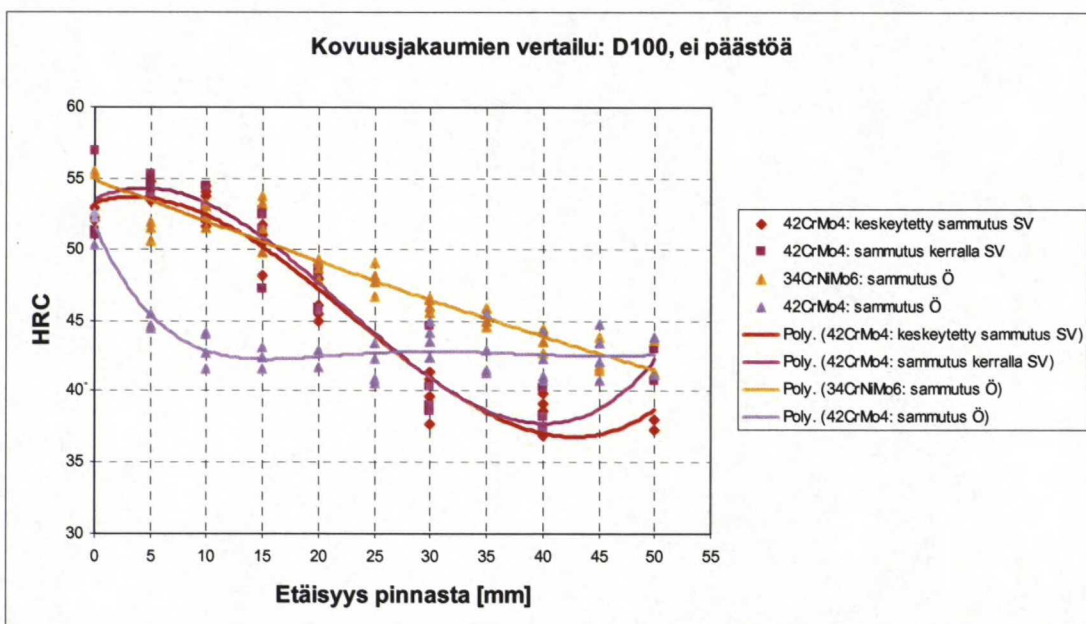
Kuva 52 Kovuusjakaumien vertailua halkaisijaltaan 50 mm oleville kappaleille, ei päästöä



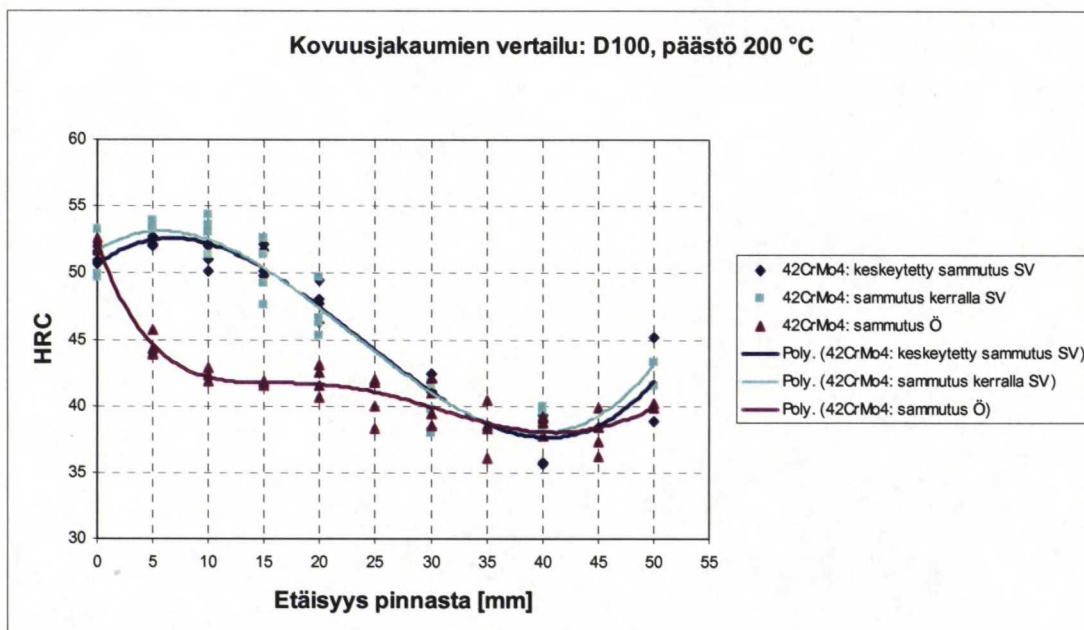
Kuva 53 Kovuusjakaumien vertailua halkaisijaltaan 50 mm oleville kappaleille, päästö 200 °C



Kuva 54 Kovuusjakaumien vertailua halkaisijaltaan 80 mm oleville kappaleille, ei päästöä



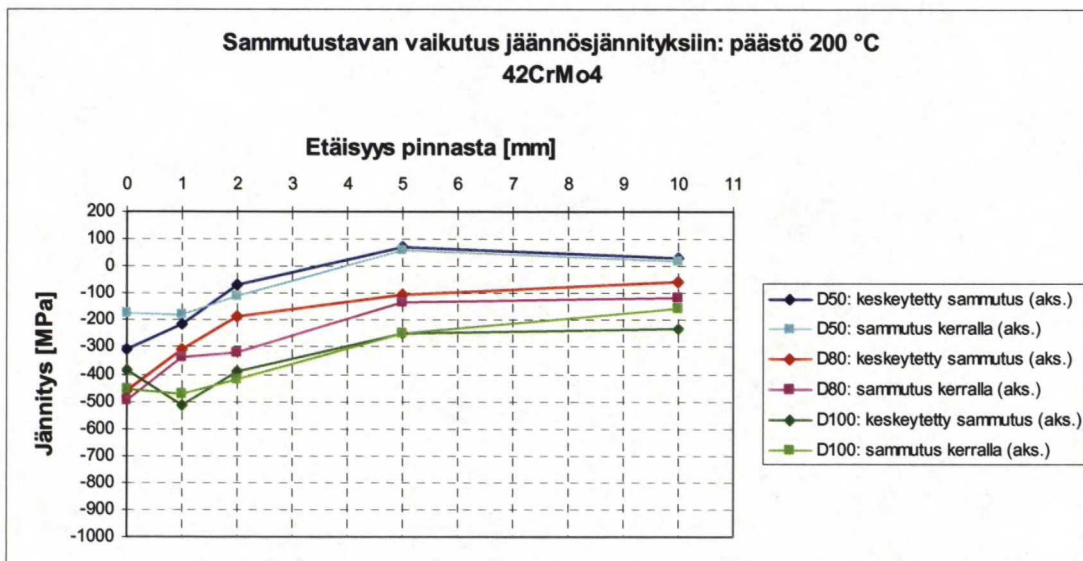
Kuva 55 Kovuusjakaumien vertailua halkaisijaltaan 100 mm oleville kappaleille, ei päästöä



Kuva 56 Kovuusjakaumien vertailua halkaisijaltaan 100 mm oleville kappaleille, päästö 200 °C

9.4 Jäännösjännitys jakauma

Kappaleista mitatut jäännösjännitys jakaumat aksiaalissuunnassa eli kappaleen pituussuunnassa esitetään kuvassa 57.



Kuva 57 Sammutustavan ja kappaleen halkaisijan vaikutus aksiaalissuuntaiseen jäännösjännitykseen, päästö 200 °C

9.5 Iskusitkeys

Metlab Oy:ltä saadut iskusitkeystulokset kappaleille H (D80, sammutus kerralla + päästö 200 °C) ja I (D80, keskeytetty sammutus + päästö 200 °C) ovat taulukossa 18.

Taulukko 18 Iskusitkeystulokset, \bar{x} on mittaustulosten keskiarvo

Kappale	Ø [mm]	Sammutus- tapa	Charpy- V, +20 °C [J]			
			1	2	3	\bar{x}
H	80	Kerralla	12	12	13	12
I	80	Keskeytetty	18	17	17	17

9.6 Mitta- ja muodonmuutokset

Koekappaleiden mitta- ja muodonmuutoksille saaduista tuloksista laskettiin keskiarvot. Saaduista keskiarvoista piirrettiin kuvaajat kolmella tavalla.

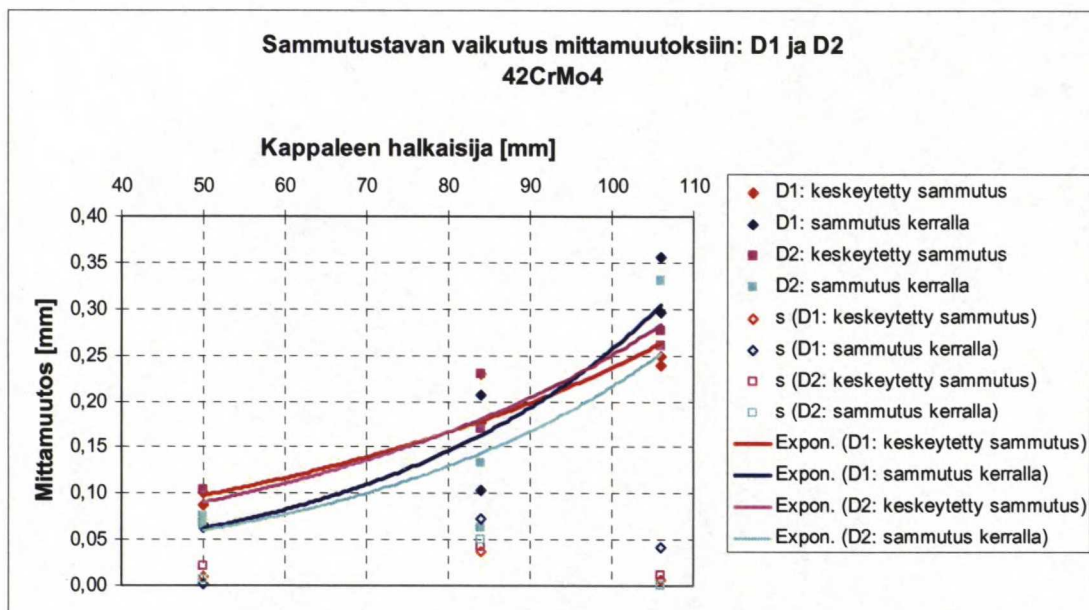
Kaikissa kuvaajissa on näkyvissä kullekin kappaleelle mittaustuloksista laskettu keskiarvo \bar{x} , jonka pisteisiin on sovitettu sopiva trendikäyrä, sekä keskihajonta s.

Keskihajonnat laskettiin Microsoft Office Excelillä kaavalla

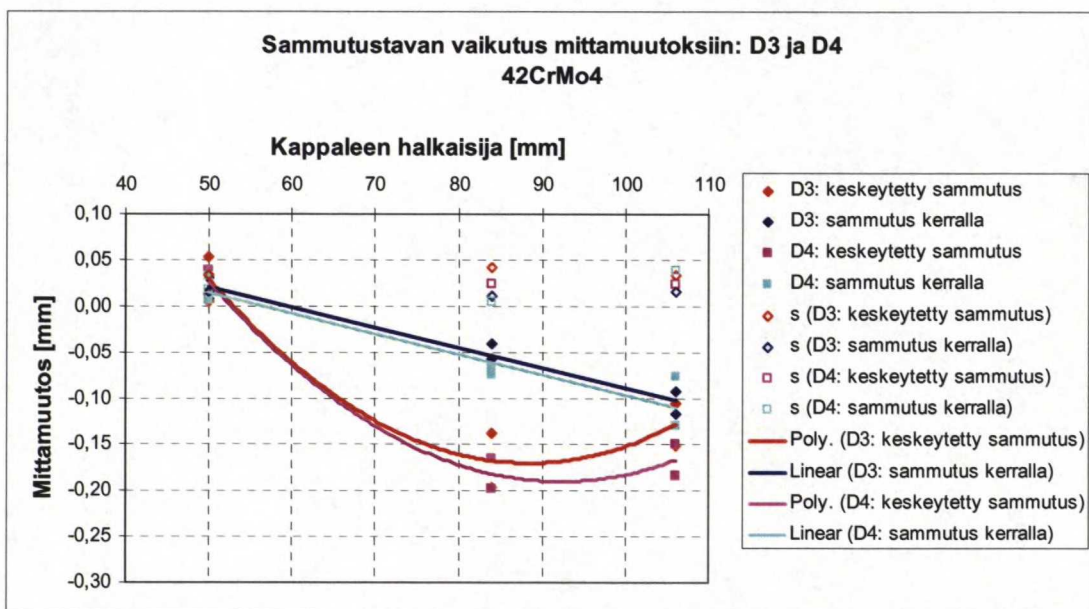
$$STDEV = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{(n - 1)}}, \quad (21)$$

jossa x on mittaustulos, \bar{x} on keskiarvo ja n on mittausten lukumäärä.

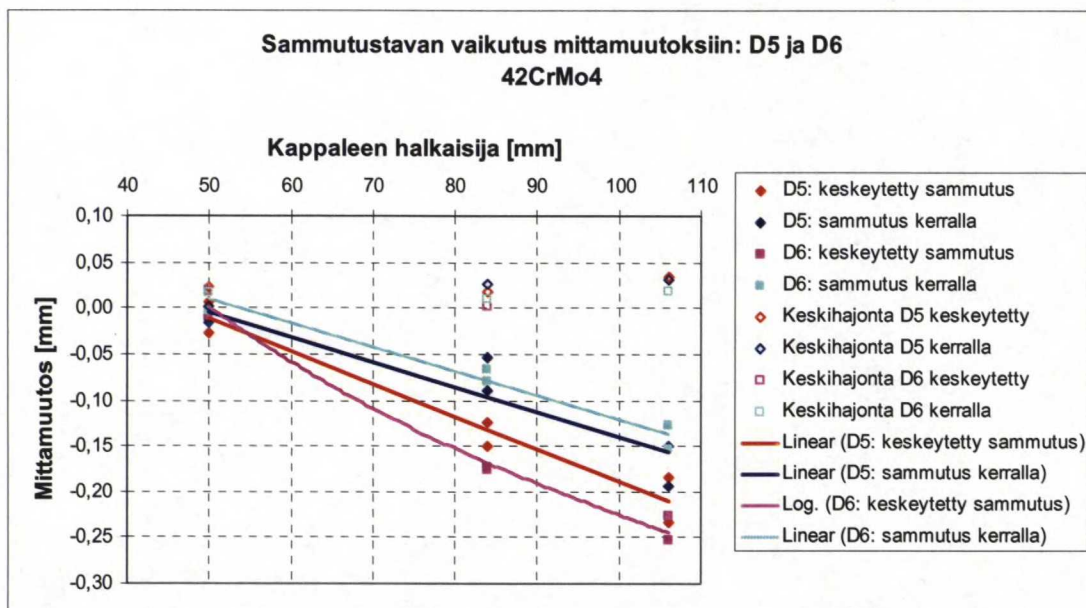
Kuvissa 58...61 ovat kuvaajat, joissa on mittamuutokset eri sammutustavoilla lämpötilassa 200 °C päästetyille kappaleille. Mittaustuloksiin on sovitettu sopiva trendikäyrä.



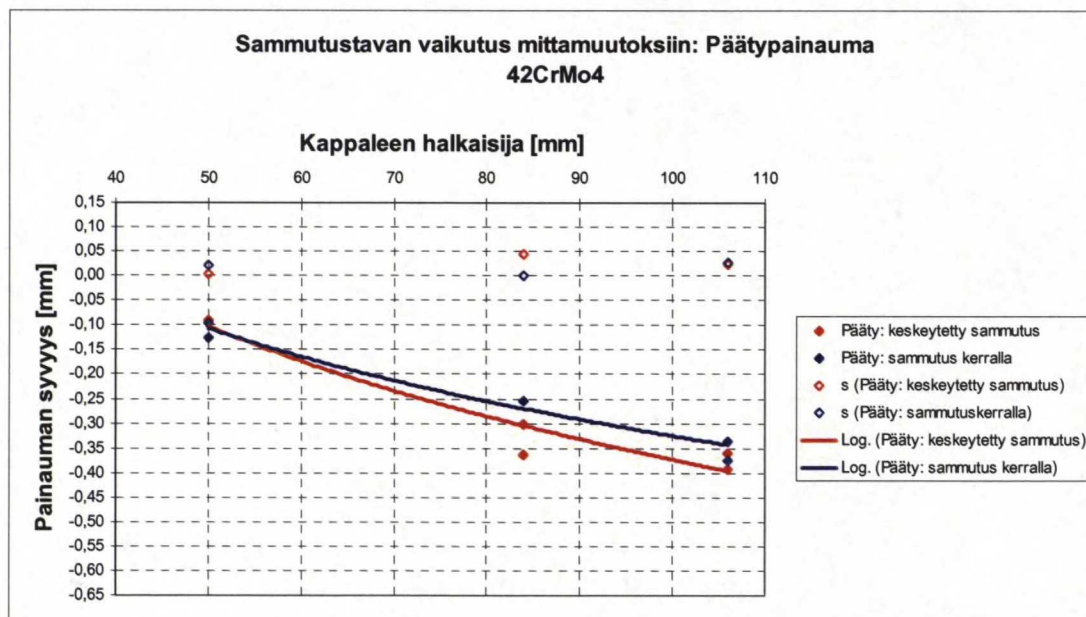
Kuva 58 Sammutustavan vaikutus mittamuutoksiin, mittauskohdat D1 ja D2



Kuva 59 Sammutustavan vaikutus mittamuutoksiin, mittauskohdat D3 ja D4

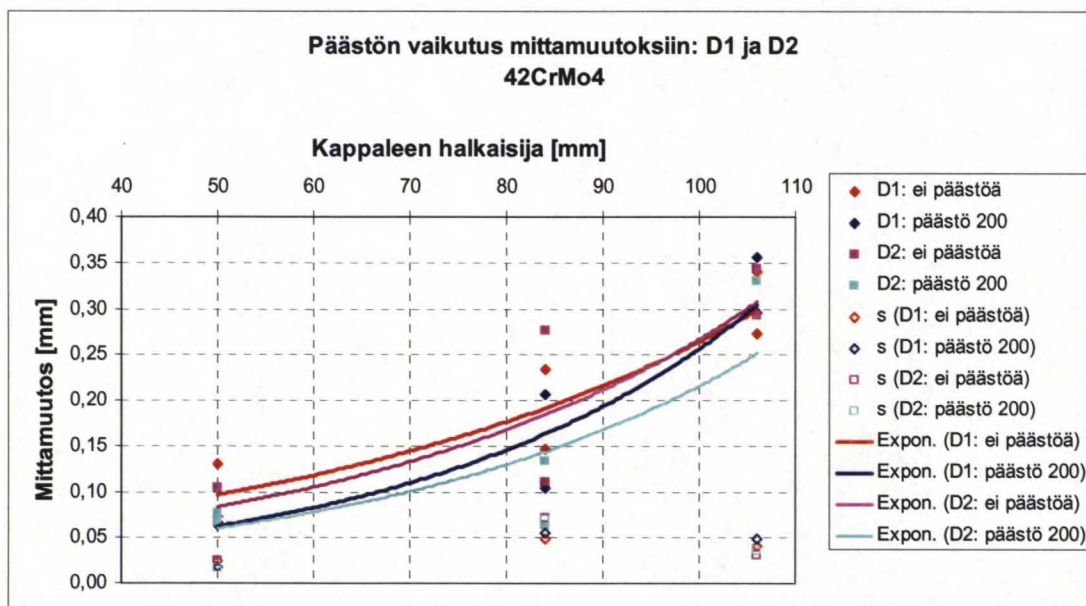


Kuva 60 Sammutustavan vaikutus mittamuutoksiin, mittauskohdat D5 ja D6

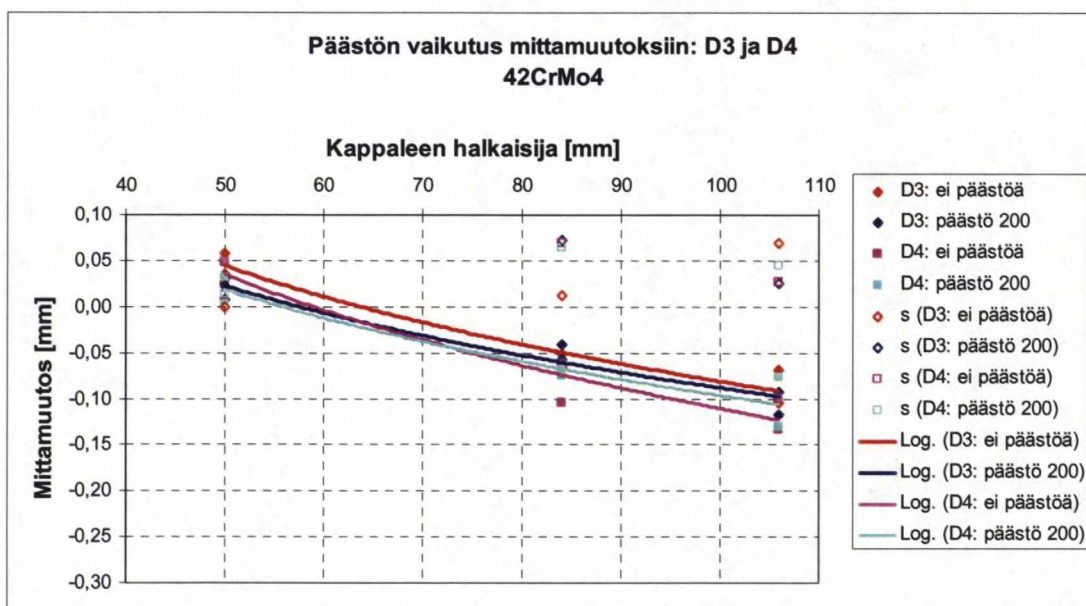


Kuva 61 Sammutustavan vaikutus mittamuutoksiin, päätypainauman syvyys

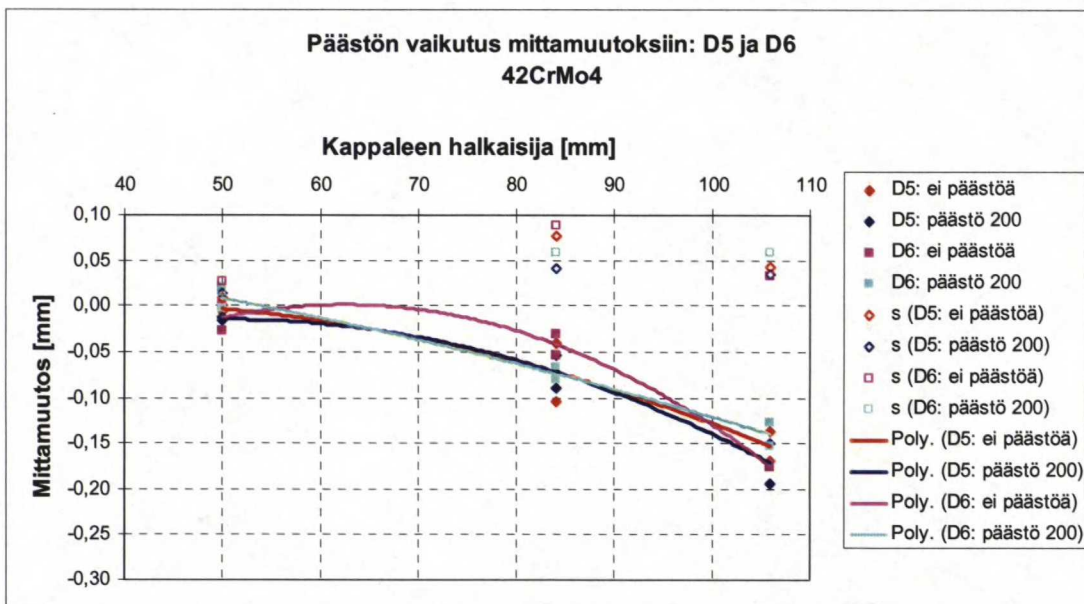
Kuvissa 62...65 on päästön vaikutus tapahtuviin mittamuutoksiin kappaleissa, jotka on sammutettu kerralla. Mittaustuloksiin on sovitettu sopiva trendikäyrä.



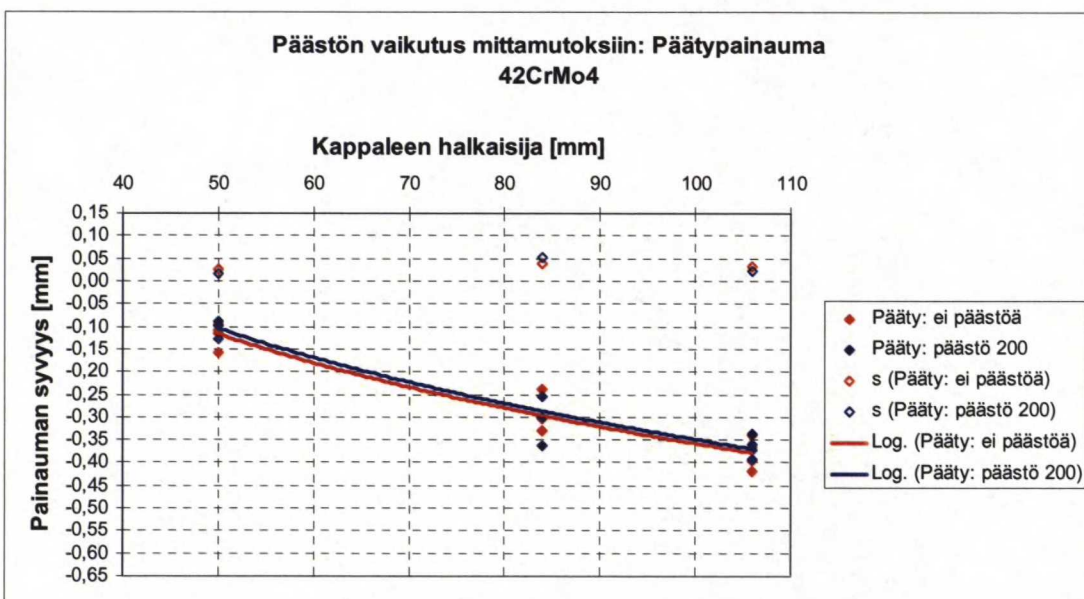
Kuva 62 Päästön vaikutus mittamuutoksiin, mittauskohdat D1 ja D2



Kuva 63 Päästön vaikutus mittamuutoksiin: mittauskohdat D3 ja D4



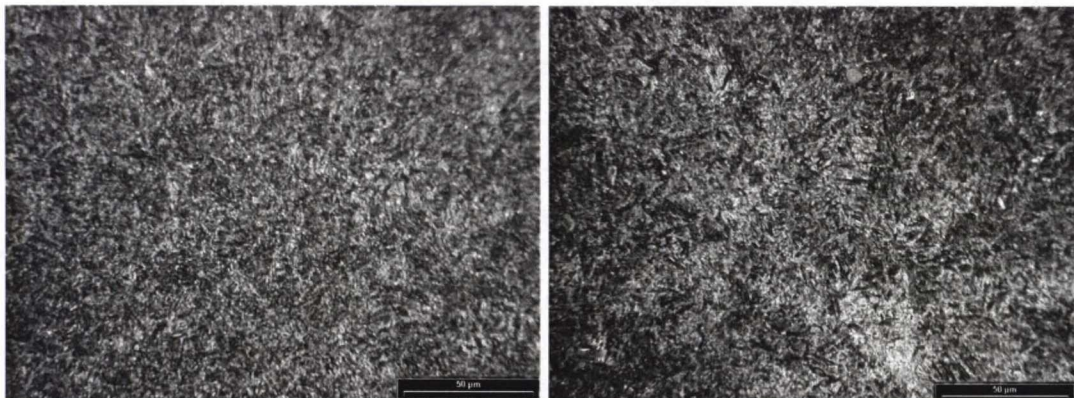
Kuva 64 Päästön vaikutus mittamuutoksiin, mittauskohdat D5 ja D6



Kuva 65 Päästön vaikutus mittamuutoksiin, päätypainauman syvyys

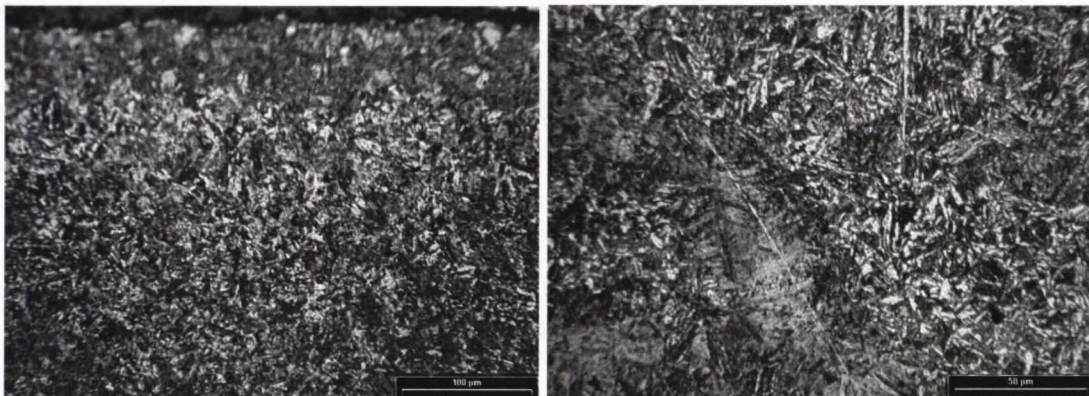
9.7 Mikrorakenne

Kuvassa 66 on halkaisijaltaan 50 mm olevan keskeytetysti sammutetun ja lämpötilassa 200 °C päästetyn kappaleen mikrorakennekuvat. Vasemmalla on kuva kappaleen pinnasta ja oikealla 20 mm syvyydeltä.



Kuva 66 Vasemmalla mikrorakennekuva halkaisijaltaan 50 mm olevan kappaleen pinnasta ja oikealla 20 mm syvyydeltä

Kuvassa 67 on halkaisijaltaan 100 mm olevan keskeytetysti sammutetun ja 200 °C:ssa päästetyn kappaleen mikrorakennekuvat. Vasemmalla on kuva kappaleen pinnasta ja oikealla 40 mm syvyydeltä.



Kuva 67 Vasemmalla mikrorakennekuva halkaisijaltaan 100 mm olevan kappaleen pinnasta ja oikealla 40 mm syvyydeltä

10 Simulointi

Numeeriset simuloinnit suoritettiin TKK:lla Materiaalien muokkauksen ja lämpökäsittelyn laboratoriossa. Käytetty simulointiohjelma oli Deform 2D, jolla voidaan simuloida kaksiulotteisessa muodossa esitettäviä kappaleita.

Tässä työssä oli tarkoituksena simuloida kappaleiden jäähtymisnopeutta ja siten niihin saatavaa kovuustasoa suolavesikarkaisussa. Lisäksi simuloitiin öljykarkaisua. Taulukossa 19 on esitetty simulointiin valittujen kappaleiden dimensiot.

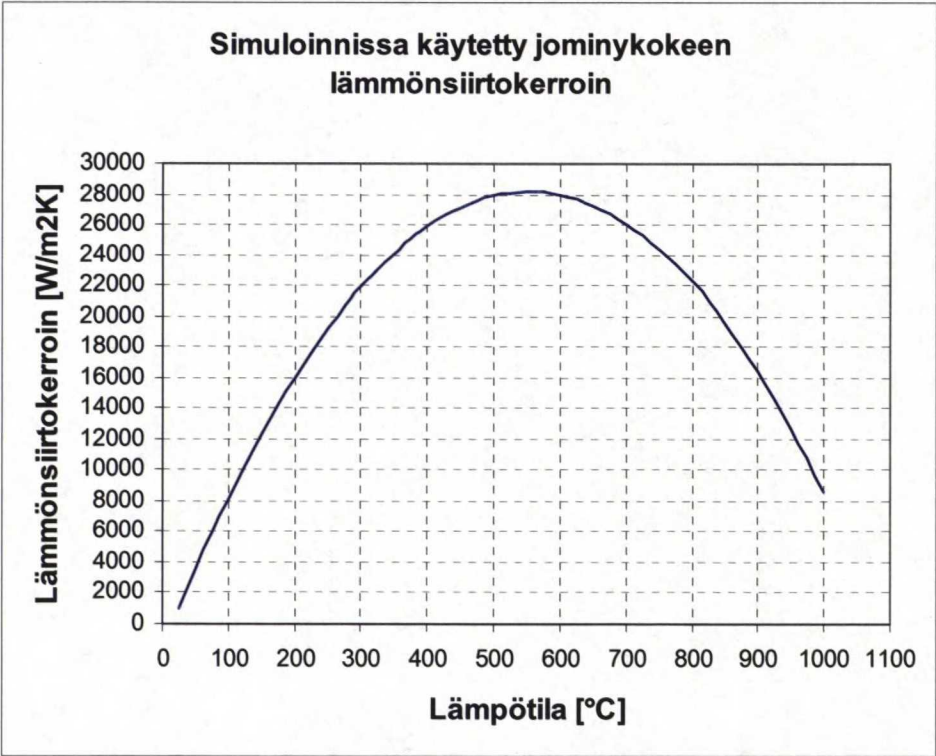
Taulukko 19 Simuloinnissa käytettyjen kappaleiden dimensiot

Halkaisija [mm]	Pituus [mm]
50	530
100	1050

Simuloinnin ensimmäisenä vaiheena oli jominykäyrän simuloiminen vastaamaan simuloitavan teräksen jominykäyrää. Simulointia varten tarvittava lämmönsiirtokerroin jominykokeessa kappaleen otsapinnasta arvioitiin D. Hömbergin tutkimuksessaan /55/ esittämän yhtälön

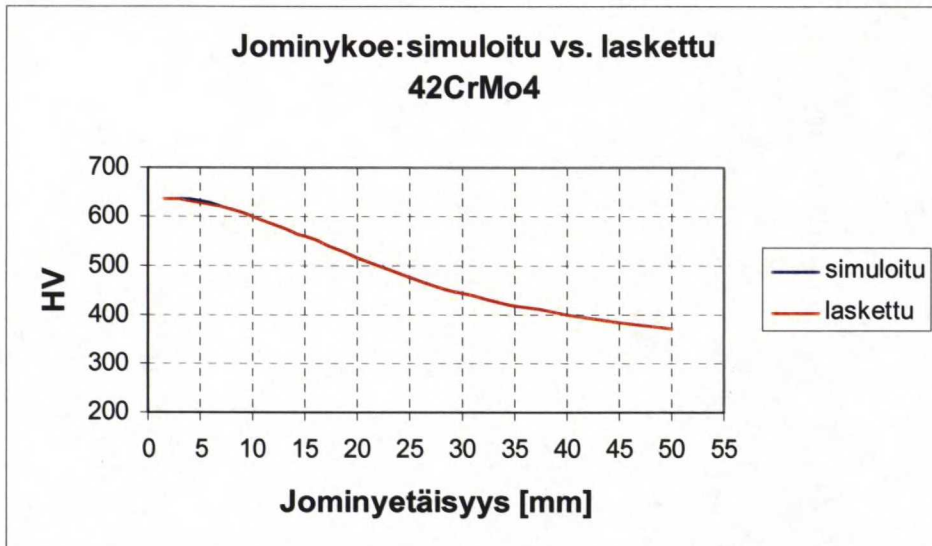
$$\gamma(T) = -0,167 \cdot 10^4 + 0,108 \cdot 10^3 T - 0,977 \cdot 10^{-1} T^2 \quad (22)$$

perusteella. Kuvassa 68 on kyseisellä yhtälöllä saatu käyrä lämmönsiirtokertoimelle.



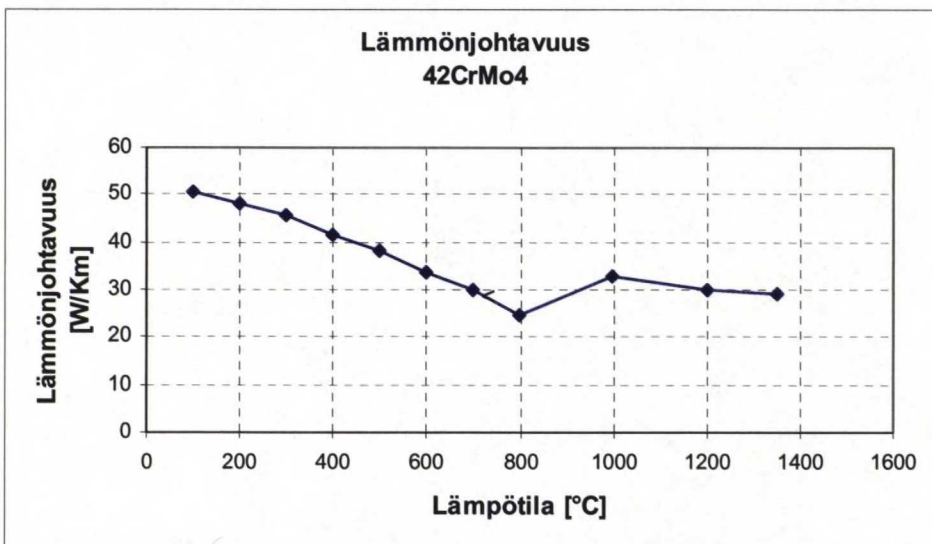
Kuva 68 Jominykokeen simuloinnissa käytetty lämmönsiirtokerroin

Simuloimalla saatu jominykäyrä saatiin vastaamaan hyvin kyseiselle teräkselle laskettua jominykäyrää, kuva 69.

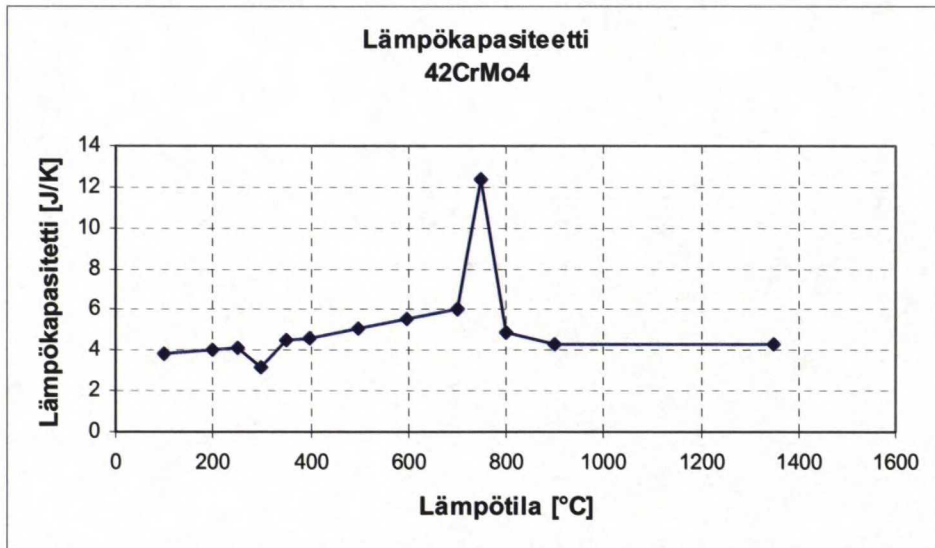


Kuva 69 Teräkselle 42CrMo4 laskettu ja simuloitu jominykäyrä

Simuloinnissa käytetty materiaaalidata 42CrMo4 -teräkselle saatiin simulointiohjelman tietokannasta. Kuvassa 70 on esitetty käytetty lämmönjohtavuus ja kuvassa 71 käytetty lämpökapasiteetti.

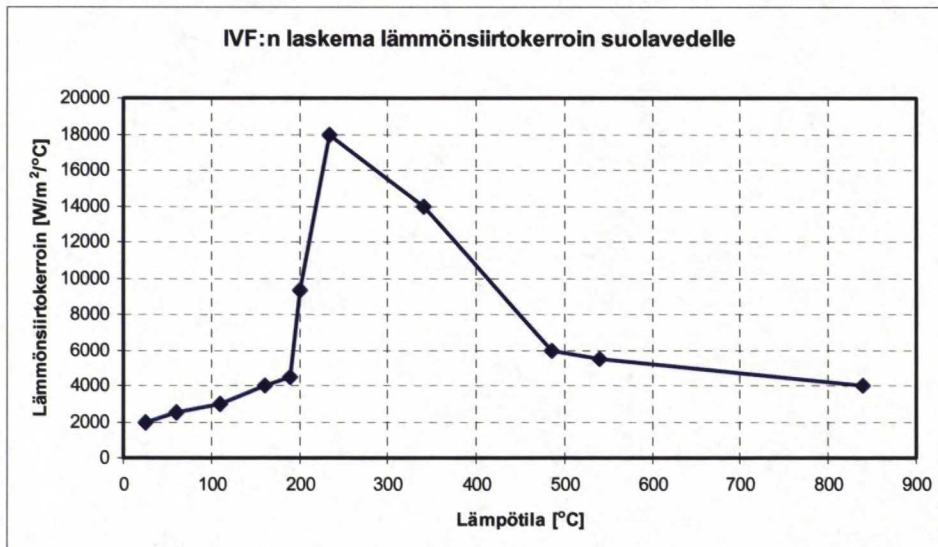


Kuva 70 Simuloinnissa käytetty lämmönjohtavuus

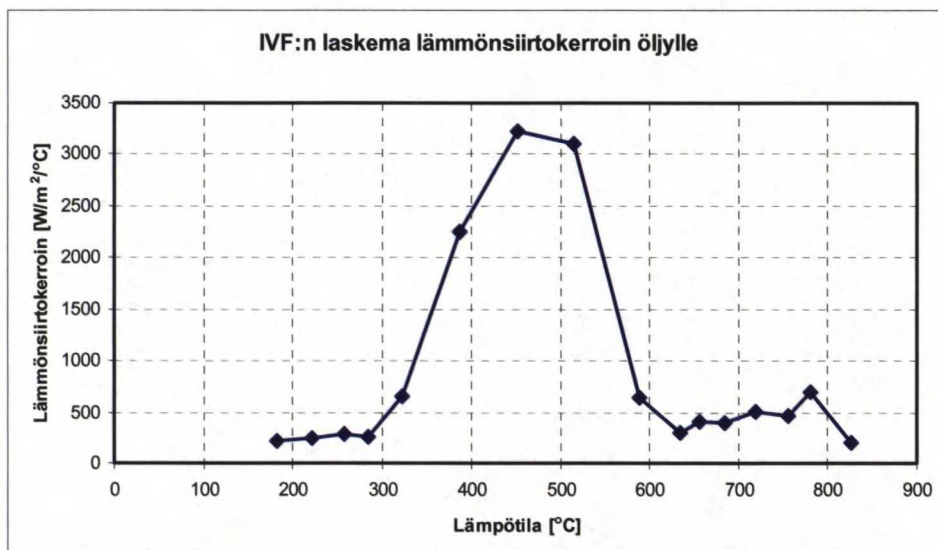


Kuva 71 Simuloinnissa käytetty lämpökapasiteetti

Kun simuloitu jominykäyrä oli saatu vastaamaan teräkselle laskettua jominykäyrää, voitiin varsinaisten kappaleiden jäähtymisnopeuden ja kovuusjakauman simuloiminen aloittaa. Simuloinnissa käytettiin kahta eri sammutusväliainetta; suolavesi ja öljy. Kuvissa 72 ja 73 on IVF SmartQuench -laitteella saaduista mittaustuloksista IVF:n laskemat lämmönsiirtokertoimet käytetyille sammutusväliaineille kappaleen lämpötilan funktiona.



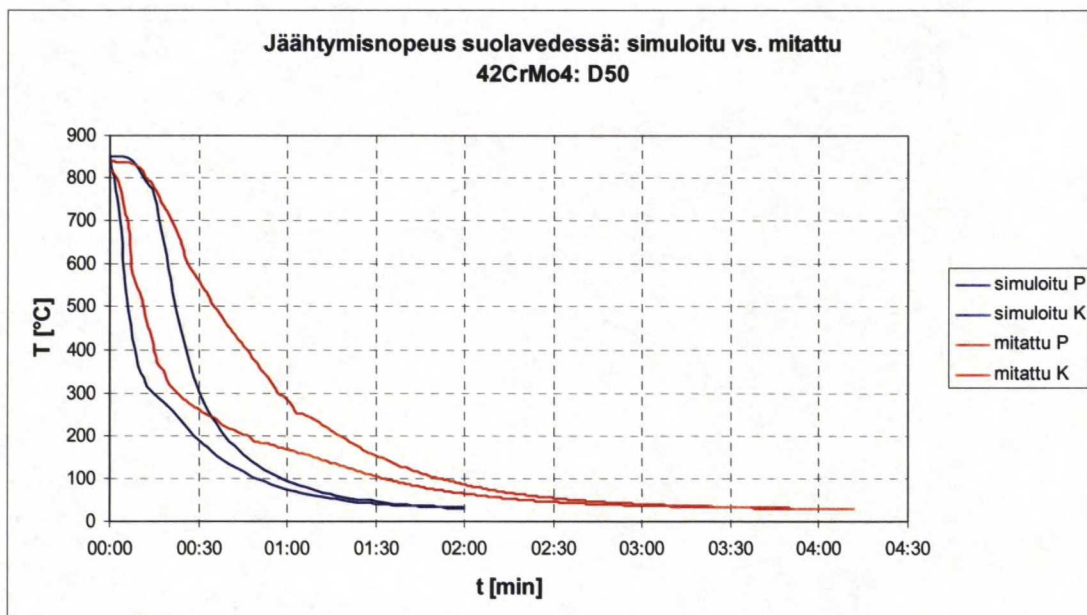
Kuva 72 Lämmönsiirtokerroin suolavedelle, T=25°C



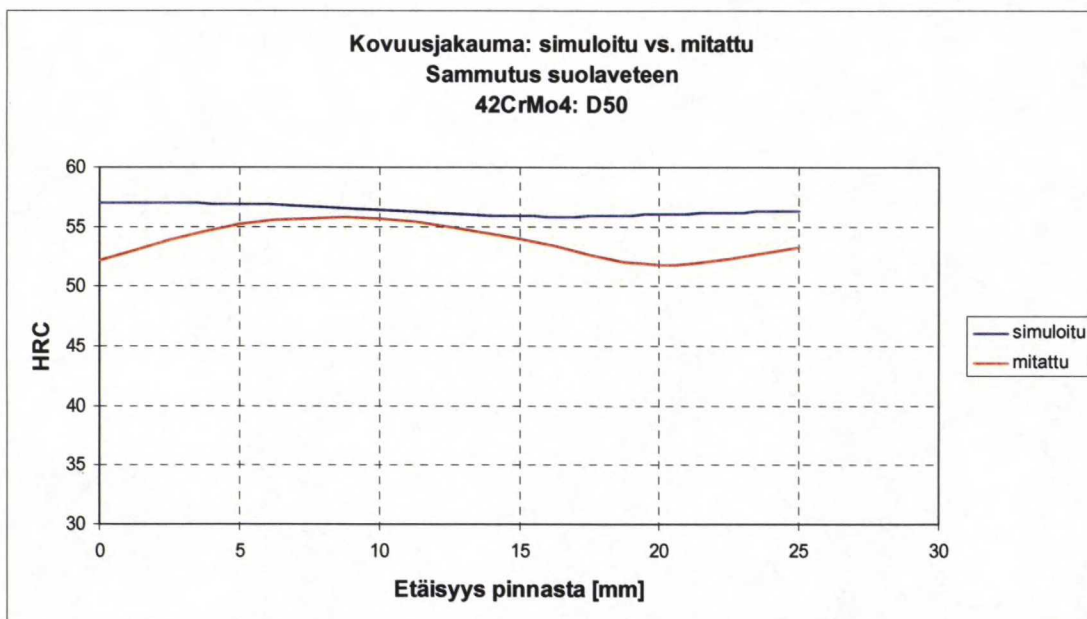
Kuva 73 Lämmönsiirtokerroin öljylle, T=51°C

Käytetty materiaalidata oli sama kuin jominykokeen simuloinnissakin käytetty.

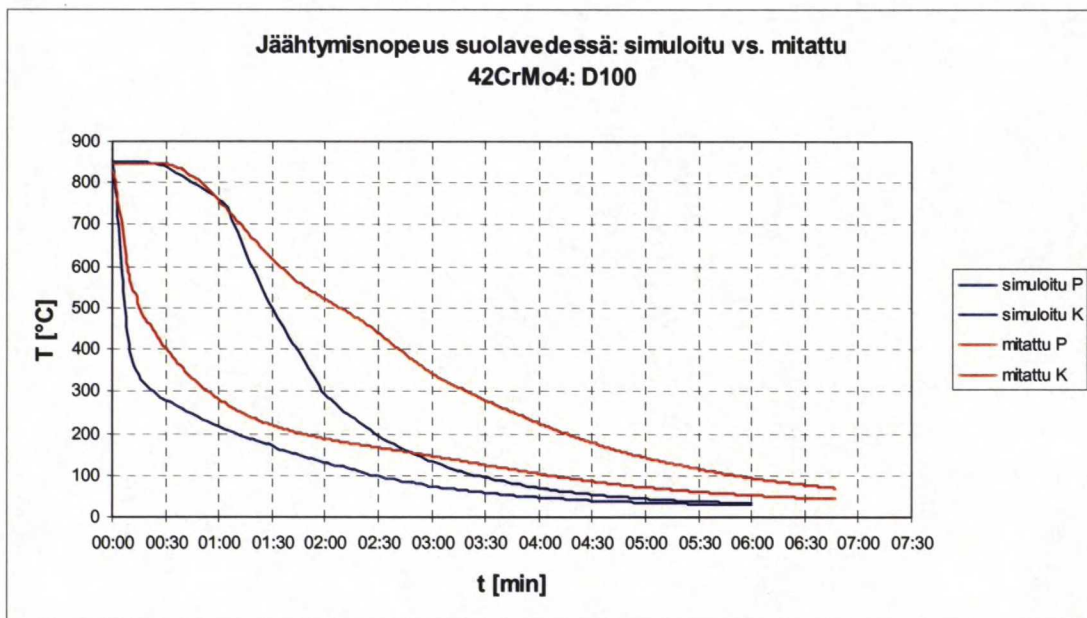
Kuvissa 74...77 ovat simuloimalla suolavesiliuokselle saadut jäähtymiskäyrät halkaisijoille 50 ja 100 millimetriä, mitatut jäähtymiskäyrät sekä simuloitua ja mitattua kovuudet suolavesisammutuksessa.



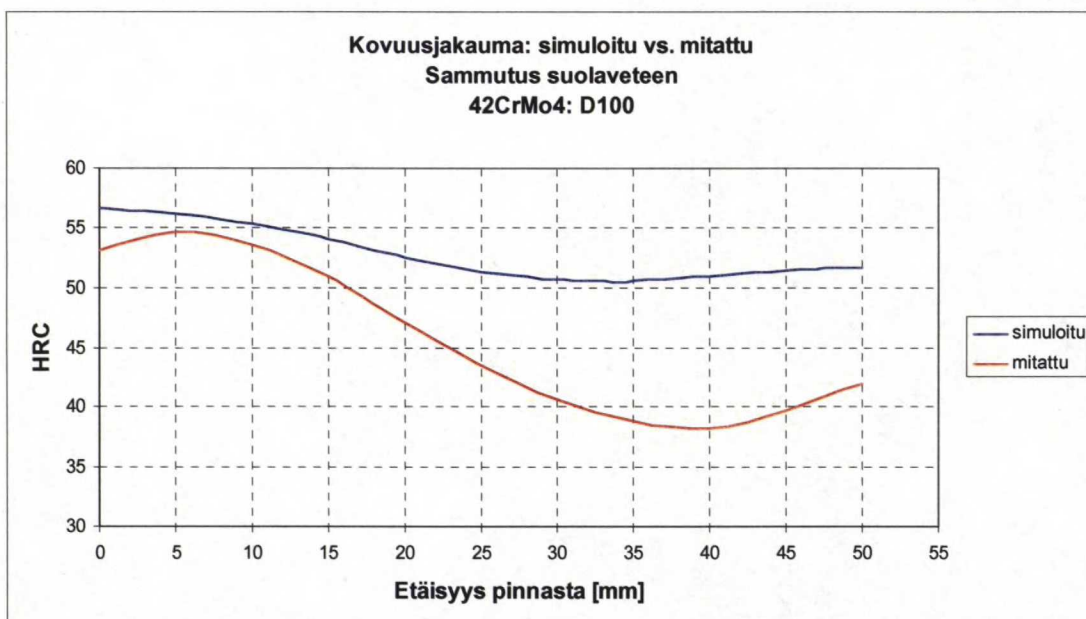
**Kuva 74 Halkaisijaltaan 50 mm olevan kappaleen simuloitu ja mitattu jäähtymisnopeus suolavedessä.
P on pinta ja K on keskusta.**



Kuva 75 Halkaisijaltaan 50 mm olevan kappaleen kovuusjakauma karkaisun jälkeen, sammutus suolaveteen.

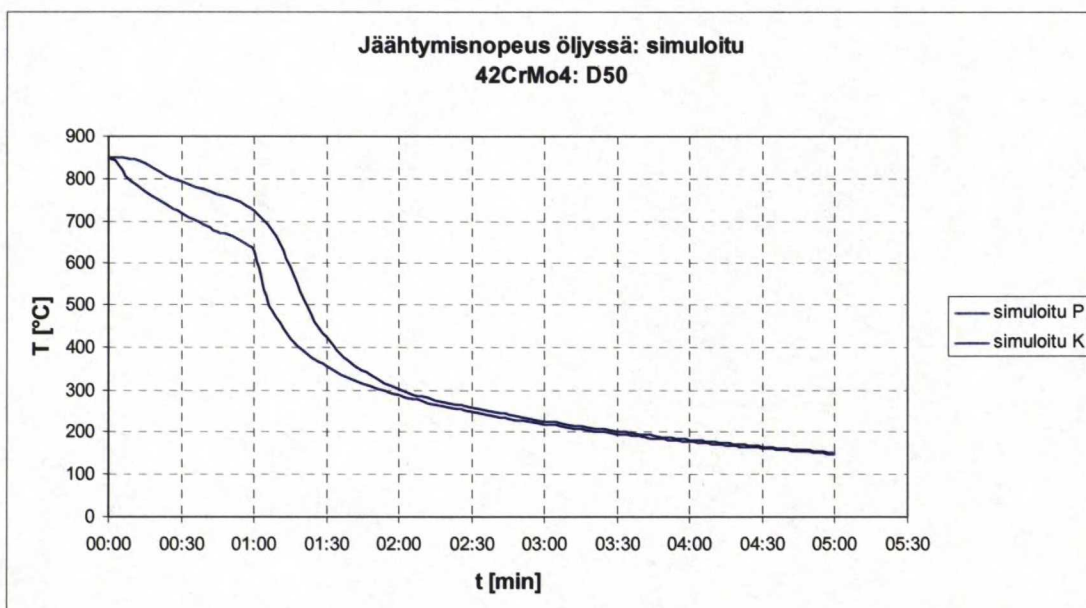


Kuva 76 Halkaisijaltaan 100 mm olevan kappaleen simuloitu ja mitattu jäähtymisnopeus suolavedessä.
P on pinta ja K on keskusta.

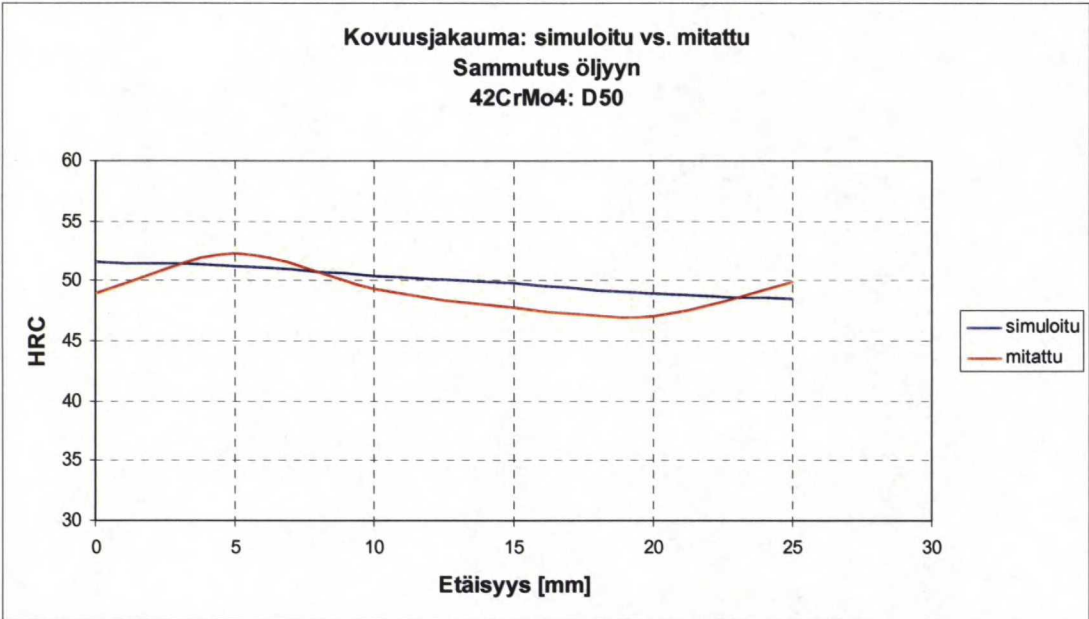


Kuva 77 Halkaisijaltaan 100 mm olevan kappaleen simuloitu ja mitattu kovuusjakauma karkaisun jälkeen, sammutus suolaveteen

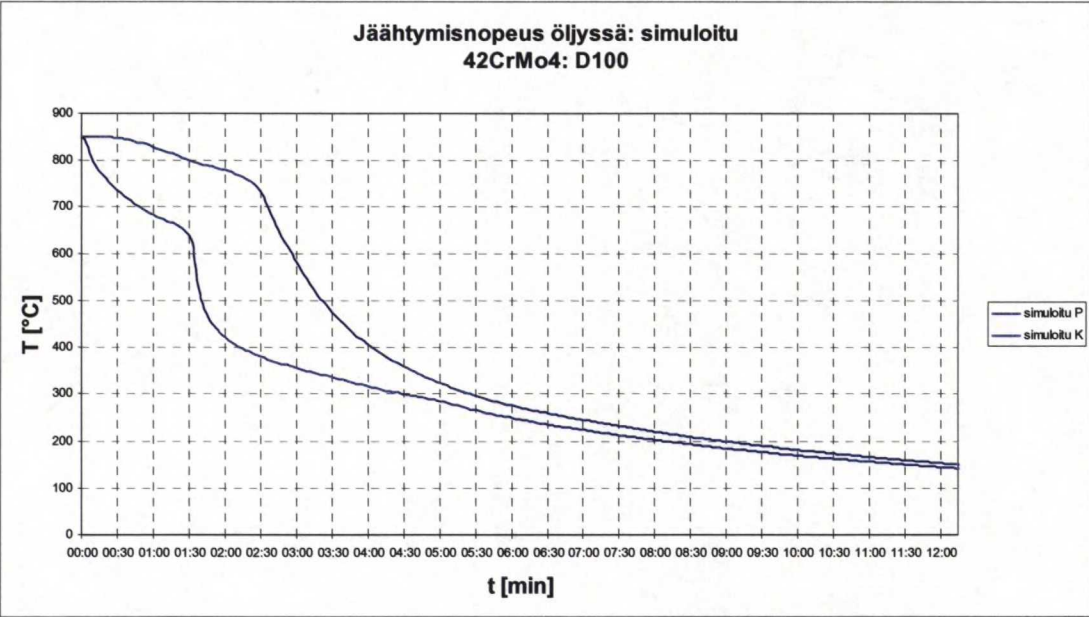
Kuvissa 78...81 ovat simuloimalla öljysammutukselle saadut jäähtymiskäyrät ja simuloidut kovuusjakaumat verrattuina mitattuihin kovuusjakaumiin halkaisijoille 50 ja 100 millimetriä.



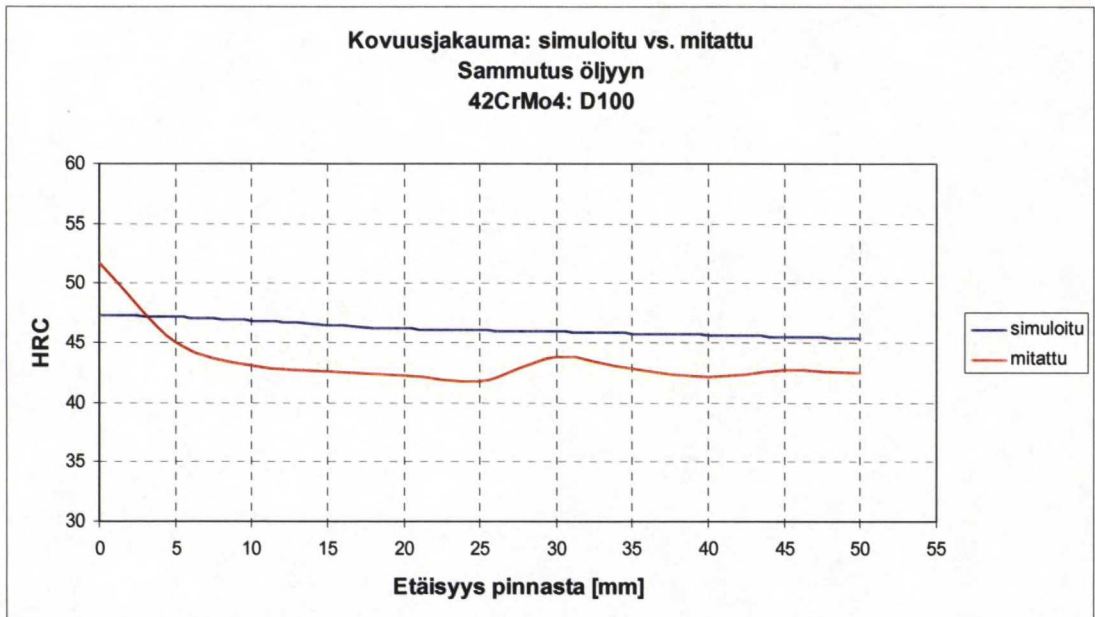
Kuva 78 Halkaisijaltaan 50 mm olevan kappaleen simuloitu jäähtymisnopeus öljyssä. P on pinta ja K on keskusta



Kuva 79 Halkaisijaltaan 50 mm olevan kappaleen simuloitu ja mitattu kovuusjakauma karkaisun jälkeen, sammutus öljyyn



Kuva 80 Halkaisijaltaan 100 mm olevan kappaleen simuloitu jäähdytysnopeus öljyssä. P on pinta ja K on keskusta



Kuva 81 Halkaisijaltaan 100 mm olevan kappaleen simuloitu ja mitattu kovuusjakauma karkaisun jälkeen, sammutus öljyyn

11 Tulosten tarkastelu

Tulosten tarkastelussa ensin käydään läpi Pieksämäellä tehdyistä karkaisuista saadut tulokset. Tämän jälkeen käydään läpi simuloinnin tulokset.

11.1 Koekarkaisun tulokset

Seuraavaksi käydään läpi koekarkaisuissa saadut tulokset sammutusaltaan jäähdytystehon, todellisten jäähtymisnopeuksien, pintakovuuksien ja kovuusjakaumien, iskutheyksien, jäännösjännitys jakauman, tapahtuvien mitta- ja muodonmuutosten sekä saadun mikrorakenteen osalta.

11.1.1 Sammutusaltaan jäähdytysteho

Käytetyn sammutusaltaan maksimijäähtymisnopeudeksi saatiin 289 °C/s. Verrattaessa tätä arvoa kuvassa 27 olevaan todella pienellä koekappaleella saatuun kuvaajaan N.I. Kobaskon tekemästä tutkimuksesta jäähtymisnopeuden vaikutuksesta kappaleen halkeiluriskiin, havaitaan mitatun jäähtymisnopeuden osuvan kohtaan, jossa särönmuodostumisen todennäköisyys on yli 75 %. Koekappaleet eivät kuitenkaan haljenneet lukuun ottamatta kahta jäähtymisnopeuksien mittaamista varten käytettyä kappaletta, jotka halkesivat ulomman termoelementtireiän kohdalta.

Yhtenä intensiivisen sammutuksen määritelmänä on, että kappaleen jäähtymisen pitäisi alkaa suoraan konvektiovaiheella /51/. Näin ei tässä tapauksessa kuitenkaan ole. Sammutusaltaan jäähdytystehon mittaustuloksissa SmartQuench -laite ilmoittaa kiehumisvaiheen alkavan lämpötilassa noin 845 °C ja konvektiovaiheen vasta lämpötilassa noin 160 °C. Kaikki kolme jäähtymisvaihetta esiintyy näin ollen sammutuksessa.

Intensiivisen sammutuksen patentissa /51/ on esitetty miten voidaan laskea tarvittava lämmönsiirtokerroin, jotta jäähtyminen alkaisi suoraan konvektiovaiheella. Lämmönsiirtokertoimen laskemiseen tarvitaan kaavaa

$$Bi \geq \frac{2(v_0 - v_1)}{v_{Hed} + v_1}, \quad (23)$$

jossa

$$Bi = \frac{hR}{\lambda} \quad (24)$$

ja

$$v_1 = \frac{1}{\beta} \left[\frac{2\lambda(v_0 - v_1)}{R} \right]^{0.3}. \quad (25)$$

Kaavoissa h = lämmönsiirtokerroin

λ = lämmönjohtavuus

R = kappaleen säde

$v_0 = T_0 - T_K$

T_0 = austenitointilämpötila

T_K = sammutusväliaineen kiehumispiste

$v_{Hed} = T_K - T_C$

T_C = sammutusväliaineen lämpötila

Koska lasketaan lämmönsiirtokertoimen arvoa, jolloin sammutus alkaa suoraan konvektiovaiheella, käytetään lämmönjohtavuuden arvoa lämpötilassa 800 °C. Kuvan 70 perusteella tämä arvo on noin 25 W/Km. Laskuissa käytettävä austenitointilämpötila on 850 °C, sammutusväliaineen kiehumispiste noin 100 °C ja sammutusväliaineen lämpötila noin 30 °C. Patentin /51/ mukaan β arvo on 3 noin 20 °C:lle vedelle.

Kaavoista 23...25 saadaan taulukon 20 mukaiset lämmönsiirtokertoimen arvot, joilla koekappaleiden jäähtyminen alkaisi suoraan konvektiovaiheella.

Taulukko 20 Lasketut lämmönsiirtokertoimet jäähtymisen alkamiseksi suoraan konvektiovaiheella koekappaleilla Ø50... Ø100 mm

Ø [mm]	50	80	100
h [W/m ² K]	14838	9632	7835

Halkaisijaltaan 12 mm olevalla mitta-anturilla mitattuna, lämmönsiirtokertoimeksi sammutuksen alkuvaiheessa lämpötilassa 840 °C saatiin noin 4000 W/Km. Tämä todistaa myös sen, ettei jäähtyminen millään panoksella voinut alkaa suoraan konvektiovaiheella.

Toinen edellytys intensiiviselle sammutukselle on Biotin luku, jonka arvon täytyisi ylittää 20 /20/. Kaavalla 24 voidaan laskea tarvittavat lämmönsiirtokertoimet kullekin koekappaleelle, jotta Biotin luku 20 ylitettäisiin. Lasketut kriittiset lämmönsiirtokertoimet on esitetty taulukossa 21.

Taulukko 21 Tarvittava lämmönsiirtokerroin h, jolla saavutetaan intensiivisen sammutuksen olosuhteet eri koekappaleiden halkaisijoilla. Lämmönjohtumisen arvot ovat kuvasta 70.

T (°C)	λ [W/Km]	h (Ø50) [W/m ² K]	H (Ø80) [W/m ² K]	h (Ø100) [W/m ² K]	H (Ø125) [W/m ² K]	H (Ø140) [W/m ² K]
100	50,7	40560	25350	20280	16224	14486
199	48,1	38480	24050	19240	15392	13743
299	45,7	36560	22850	18280	14624	13057
399	41,7	33360	20850	16680	13344	11914
499	38,3	30640	19150	15320	12256	10943
599	33,9	27120	16950	13560	10848	9686
699	30,1	24080	15050	12040	9632	8600
799	24,7	19760	12350	9880	7904	7057

Taulukkoon 22 on kerätty kuvasta 72 otettuja lämmönsiirtokertoimen arvoja käytetylle suolavesiliuokselle kappaleen jäähtymisen aikana. Tulokset on saatu halkaisijaltaan 12 mm olevalla mitta-anturilla.

Taulukko 22 SmartQuench -mittaustuloksista IVF:n laskemia lämmönsiirtokertoimien arvoja kappaleen jäähtymisen aikana mitta-anturille Ø 12 mm.

T [°C]	h [W/m ² K]
26	2000
60	2500
110	3000
161	4000
190	4500
200	9300
234	18000
341	14000
486	6000
540	5500
840	4000

Vertaamalla taulukon 21 arvoja taulukon 22 arvoihin, havaitaan, etteivät halkaisijaltaan 12 mm olevalla mitta-anturillakaan mitatut lämmönsiirtokertoimet ylitä kyseisellä halkaisijalla vaadittuja intensiivisen sammutuksen lämmönsiirtokertoimen arvoja. Näin ollen kokeissa käytetty sammutusjärjestelmä ei täytä intensiivisessä sammutuksessa vaadittuja olosuhteita

11.1.2 Koekappaleiden todelliset jäähtymisnopeudet

Kappaleiden jäähtymisnopeuksissa esiintyi mittausvirheitä käyriissä EP, EK ja IK, kuvat 44 ja 46. Termoelementtien EP ja EK mittaama lämpötila laski yhtäkkiä jyrkästi lähes sataan asteeseen ja elementillä IK lähes kahteensataan asteeseen. Syynä virhetuloksiin on todennäköisesti suolaveden pääsy termoelementtien mittapäähän. Kaikissa kolmessa tapauksessa käytetyn termoelementin halkaisija oli 1,5 mm. Termoelementtireiät olivat kuitenkin halkaisijaltaan 5 mm lähes koko matkaltaan. Sammutusväliainetta on voinut päästä reikiin, koska niitä ei yritetty tukkia mitenkään. Muissa kappaleissa, joissa käytettiin ohuita termoelementtejä, reiät tukittiin tulenkestävän villan avulla.

Käyrässä HK, kuva 44, on myös havaittavissa selvää heiluntaa mittaustuloksissa. Syynä on todennäköisesti termoelementin huono kontakti kappaleen kanssa. Elementti ei todennäköisesti ole ollut aivan reiän pohjassa, jolloin kontakti kappaleeseen on jäänyt epätäydelliseksi.

Käyrässä NK, kuva 46, havaittavissa oleva muutos jäähtymiskäyrässä lämpötilassa noin 500 °C selittyy alkavalla bainiittireaktiolla, vertaa kuva 34.

Keskeytetyssä sammutuksessa lämpötila tasaantuu 200...230 °C, kun sammutus keskeytetään keskustan lämpötilan ollessa noin 400 °C, kuva 47. Tämä ei juuri tuo muutoksia kappaleiden mekaanisiin ominaisuuksiin, koska lämpötila, johon kappale tasaantuu, on alhainen. Kappaleelle D50 keskeytetyn sammutuksen vaikutus on vielä pienempi kuin muilla, koska sen lämpötila tasaantui noin 90 °C:een. Halkaisijaltaan 50 mm olevat kappaleet olivat samassa panoksessa kuin halkaisijaltaan 80 mm olevat kappaleet ja sammutuksen keskeytyksen ajankohta valittiin kappaleen D80 perusteella, jolloin sammutusajaksi tuli aivan liian pitkä. Todellisuudessa näitä kahta halkaisijaa ei voida käsitellä samassa panoksessa. Samasta syystä kappaleelle D50 ei voida määrittää kuvaajista lämpötilan tasaantumisen kestoaikaa.

Jos keskeytetyllä sammutuksella halutaan saada selviä vaikutuksia materiaaliominaisuuksiin, täytyisi keskeytys suorittaa aiemmin. Ehkä siten, että kappaleen lämpötila tasaantuisi martensiitin muodostumisen alkamislämpötilan paikkeille. Kyseinen lämpötila on 42CrMo4 -teräkselle reilussa kolmessasadassa asteessa, vertaa kuva 35. Taulukkoon 23 on laskettu käytetylle sulatuksille martensiitin muodostumisen alkamislämpötilat kolmella taulukon 2 kaavoista.

Taulukko 23 Lasketut martensiitin muodostumisen alkamislämpötilat käytetyille 42CrMo4 -teräksen sulatuksille

Sulatus	[no.]	60082	51985
Steven and Haynes	[°C]	317	311
Andrews (linear)	[°C]	325	321
Andrews (product)	[°C]	323	318

Intensiivisen sammutuksen patentissa /51/ keskeytyksen ajankohdaksi määritetään

$$\tau = \frac{K}{aKn} (b + 0,24k), \quad (26)$$

jossa K = Kondratjevin muototekijä (Katso kaava 6)

a = lämpödiffusiviteetti ($0,08 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$)

Kn = Kondratjevin luku $0,6 \leq Kn \leq 1$ (Katso kaavat 5, 9 ja 10)

k = vakio, sylinterille 2

$$b = \ln \left(\frac{T_0 - T_c}{T_{\text{core}} - T_c} \right) \quad (27)$$

T_0 = austenitointilämpötila (850 °C)

T_c = sammutusväliaineen lämpötila (25 °C)

T_{core} = kappaleen keskustan lämpötila (400 °C)

Käyttämällä edellä olevia kaavoja keskeytyksen ajankohdaksi tulee taulukon 24 mukaiset ajat, kun keskeytys halutaan suorittaa kappaleen keskustan lämpötilan ollessa 400 °C. Taulukossa 25 on keskeytyksen ajankohdan laskemisessa käytetyt parametrit. Laskuissa käytetyt lämmönjohtavuuden ja lämmönsiirtokertoimen arvot ovat keskimääräisiä arvoja sammutuksen aikana, kuvat 70 ja 72.

Taulukko 24 Sammutuksen keskeytyksen ajankohdat, mitattu ja laskettu

Ø [mm]	Mitattu t [min]	Laskettu t [min]
50	1:00	0:30
80	2:00	1:00
100	2:45	1:30

Taulukko 25 Sammutuksen keskeytyksen ajankohdan laskemisessa käytetyt parametrit

R [m]	0,025	0,04	0,05	0,0625	0,07
α [W/m ² K]	10000	10000	10000	10000	10000
λ [W/mK]	39	39	39	39	39
a [m ² /s]	$0,08 \cdot 10^{-4}$	$0,08 \cdot 10^{-4}$	$0,08 \cdot 10^{-4}$	$0,08 \cdot 10^{-4}$	$0,08 \cdot 10^{-4}$
T_0 [°C]	850	850	850	850	850
T_c [°C]	25	25	25	25	25
T_{core} [°C]	400	400	400	400	400
k	2	2	2	2	2

Taulukosta 24 havaitaan lasketun ja mitatun keskeytyksen ajankohdan poikkeavan toisistaan huomattavasti. Laskettuun ajankohtaan aiheuttaa virhettä käytetty materiaalityö, koska se ei ole tarkkaa. Esimerkiksi lämmönjohtavuus ja lämmönsiirtokerroin ovat todellisuudessa lämpötilariippuvaisia. Mitattuihin keskeytyksen ajankohtiin vaikuttaa puolestaan huomattavasti se, mistä kohden sammutuksen ajatellaan alkavan.

11.1.3 Pintakovuus ja kovuusjakauma

Tarkasteltaessa päästön ja sammutustavan vaikutusta kovuusjakaumiin, kuvat 48...50, havaitaan, ettei päästöllä lämpötilassa 200 °C ole merkitystä saatuun kovuustasoon. Tuloksissa näkyvät erot selittyvät kovuusmittauksissa esiintyvillä mittausepä-tarkkuuksilla. Kovuusmittauksissa esiintyviä virhemahdollisuuksia ja epätarkkuuksia ovat materiaalin epähomogeenisuus, koekappaleen valmistus, itse mittaja ja mittaustuloksen kunto. On olemassa useita menetelmiä, joilla voidaan tarkistaa Rockwellin kovuuskokeen epätarkkuutta. Esimerkkejä löytyy muun muassa lähteistä /56, 57/.

Päästämättömien kappaleiden kovuusjakaumat saattoivat muuttua vastaamaan lämpötilassa 200 °C päästettyjen kappaleiden kovuusjakaumia kovuusjakaumamittauksista varten valmistettujen kiekkojen työstön yhteydessä, koska kiekkot kuumenivat sekä leikkurissa että hiomalaitteissa. Eri sammutustapojen välillä ei ole havaittavissa yhdenmukaista selkeää eroa kovuusjakaumaan. Syynä on liian myöhäinen keskeytyksen ajankohta.

Kovuusjakaumissa on havaittavissa kovuuden nousu kappaleen keskusta mentäessä. Tämä selittyy seosaineiden suotautumisen kappaleen keskusta teräksen jäähmettymisen yhteydessä. Suotautumisen seurauksena keskustan karkenevuus on parempi kuin muualla.

Aivan pinnan alhainen kovuus selittyy sillä, että pintakovuus mitataan eri suunnasta kuin kovuusjakauma. Pintakovuudet mitattiin kokonaisista kappaleista suoraan ulkopinnalta ja kovuusjakauma mitattiin kappaleen poikkipinnasta sitä varten irrotetusta kiekosta. Näin ollen näitä tuloksia ei oikein voida vertailla. Ennen pintakovuusmittausta kappaleista poistettiin kenties liian vähän ainetta pois, mikä osaltaan selittäisi pinnan alhaisemman kovuuden. Mittaustulosten vaihtelut eri mittauspisteissä selittyvät ainakin osaksi sillä, ettei teräksen koostumus ole kauttaaltaan samanlainen. Kappale on myös saattanut jäähtyä eri nopeudella panoksen ulkoreunalla olleelta puolelta kuin panoksen keskustassa olleelta puolelta, mikä osaltaan vaikuttaa saatuihin mittaustuloksiin.

Aivan kappaleen pinnasta mitattu kovuus on alhaisempi kuin 5 mm etäisyydeltä mitattu. Tämän seurauksena kuvaajia tarkasteltaessa maksimikovuus näyttäisi olevan 5 mm syvyydellä, vaikka se todellisuudessa on jossain pinnan ja 5 mm syvyyden välillä, todennäköisesti hyvin lähellä pintaa. Myöskään kovuuden minimikohta ei ole juuri

kuvaajien näyttämässä paikassa, johtuen mittauspisteiden suhteellisen pitkistä välimatkoista.

Tarkasteltaessa kappaleen halkaisijan vaikutusta saatavaan kovuusjakaumaan, kuva 51, havaitaan vain kappaleen D50 karkenevan läpi. Muilla kappaleilla keskustan kovuustaso on jo huomattavasti alempi kuin pinnan.

Kappaleiden keskustasta otettuja mittaustuloksia ei voida pitää täysin luotettavina, koska standardissa on määritetty mittauspisteiden keskipisteiden väliseksi etäisyydeksi ainakin neljä kertaa painauman halkaisija, mutta vähintään 2 mm /52/. Tämä ehto ei täyty kaikissa tapauksissa.

Verrattaessa kuvissa 52...56 olevia kovuustuloksia aiemmin mitattuihin öljykarkaistulle 34CrNiMo6 teräkselle saatuihin tuloksiin, havaitaan suolavesikarkaistun 42CrMo4 teräksen kovuuden olevan kaikilla halkaisijoilla yhtä suuri tai hieman suurempi kuin öljykarkaistun 34CrNiMo6 teräksen aina syvyyteen 15 mm saakka, jonka jälkeen 34CrNiMo6 teräksen kovuus on suurempi. Tämä selittyy eroissa seosainepitoisuuksissa ja teräksen karkenevuksissa. Suolavesiliuoksen jäähdysteho riittää jäähdyttämään 42CrMo4 teräksestä valmistetun kappaleen näennäisesti yhtä hyvin tai jopa hieman paremmin kuin öljy 34CrNiMo6 teräksen aina 15 mm syvyyteen saakka. Nopeus ei kuitenkaan riitä enää syvemmälle mentäessä vaan merkittäväksi tekijäksi tulee 34CrNiMo6 teräksen parempi karkenevuus.

Verrattaessa kuvissa 52...56 olevia öljykarkaistun ja suolavesikarkaistun 42CrMo4 teräksen kovuusjakaumia, havaitaan öljykarkaisun seurauksena saadun kovuusjakauman olevan alhaisempi kuin suolavesikarkaistun. Syynä on öljyn alhaisempi jäähdystehokkuus, jonka seurauksena teräs ei karkene yhtä hyvin kuin suolavedessä.

Kovuuden tavoitetasona oli 45 HRC. Suolaveteen sammutettuna teräs 42CrMo4 täyttää vaaditun kovuustason halkaisijaan 80 mm saakka, vaikka kovuus laskeekin mittausten mukaan hieman alle tavoitetason 25 mm syvyydellä. Alitus on kuitenkin niin pieni, että se mahtuu kovuusmittauksen virhemarginaaliin. Halkaisijalla 100 mm kovuus laskee alle tavoitetason niin ikään 25 mm päässä pinnasta, ollen alimmillaan noin 37 HRC. Tätäkin halkaisijaa voidaan käyttää, jos käyttökohde on sellainen, että keskustan alempi kovuustaso voidaan hyväksyä.

Öljyyn sammutettuna 42CrMo4 -teräs täyttää kovuuden tavoitetason 50 mm halkaisijalla. Halkaisijan ollessa 80 mm, kovuus liikkuu koko ajan 45 HRC:n tuntumassa, mutta 100 mm halkaisijalle tavoitetasosta jäädään jo selkeämmin. Öljyyn sammutettuna 42CrMo4 -terästä voidaan käyttää halkaisijaan 50 mm saakka.

Teräs 34CrNiMo6 ylittää kovuuden tavoitetason 45 HRC halkaisijaan 80 mm saakka koko poikkipinnalta. Halkaisijan ollessa 100 mm kovuus laskee alle tavoitetason 35 mm syvyydellä ollen alimmillaan noin 42 HRC. Ottaen huomioon kovuusmittauksen virhemarginaalin, voidaan 34CrNiMo6 -terästä käyttää öljysammutettuna halkaisijaan 100 mm saakka.

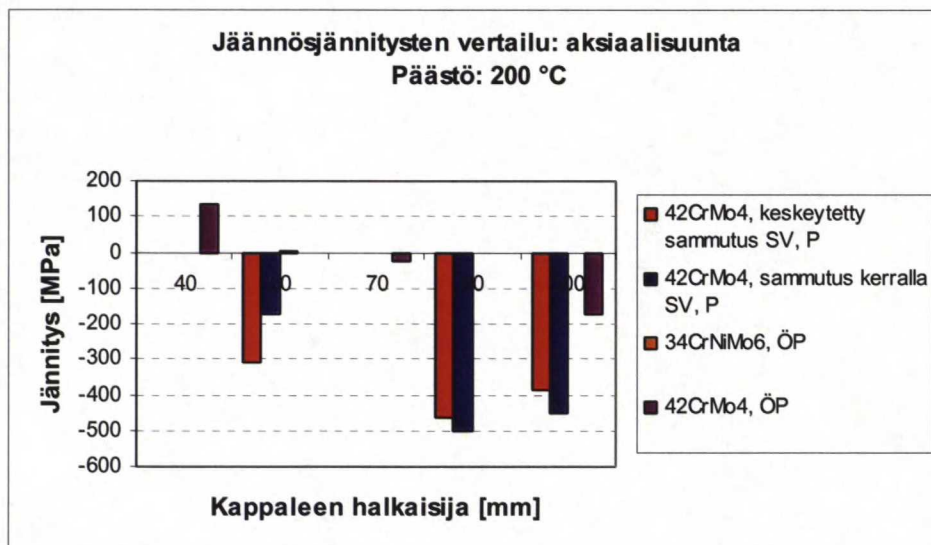
11.1.4 Jäännösjännitys jakauma

Kuvasta 57 on havaittavissa, ettei tutkituilla sammutustavoilla ole merkittävää vaikutusta syntyneeseen jäännösjännitystilaan. Syynä tähän on sammutuksen keskeytyksen ajankohta. Kappaleen halkaisijalla puolestaan on suuri vaikutus syntyneeseen jäännösjännitystilaan, kuva 57. Kappaleen halkaisijan kasvaessa puristusjäännösjännitystila kasvaa, kuten kirjallisuudessaakin mainitaan /58/. Ainoastaan kappaleen D50 päästään vetojäännösjännitystilaan ennen 10 mm syvyyttä. Syynä puristusjäännösjännitystason nousuun halkaisijan kasvaessa on suurempi kovuusero pinnan ja keskustan välillä.

Pinnan puristusjäännösjännitystila selittyy jo teoriaosuudessa mainitulla ilmiöllä. Kappaleen jäähtymisen ollessa nopeaa, muuttuu kappaleen pinta martensiittiseksi ja se laajenee. Keskustassa ei tapahdu ainakaan täydellistä martensiittitransformaatiota, joten sen ominaistilavuus jää pienemmäksi kuin pinnan (samalla kovuustaso jää alhaisemmaksi). Tämä johtaa pinnan puristusjäännösjännitystilaan ja keskustan vetojäännösjännitystilaan.

Tuloksista on huomioitavaa se, ettei aineenpoiston vaikutusta tuloksiin olla mitenkään kompensoitu.

Kuvassa 82 on vielä vertailtu nyt tehtyjä mittauksia pinnan jäännösjännitystilalle muutamiin raportissa /48/ esitettyihin tuloksiin.



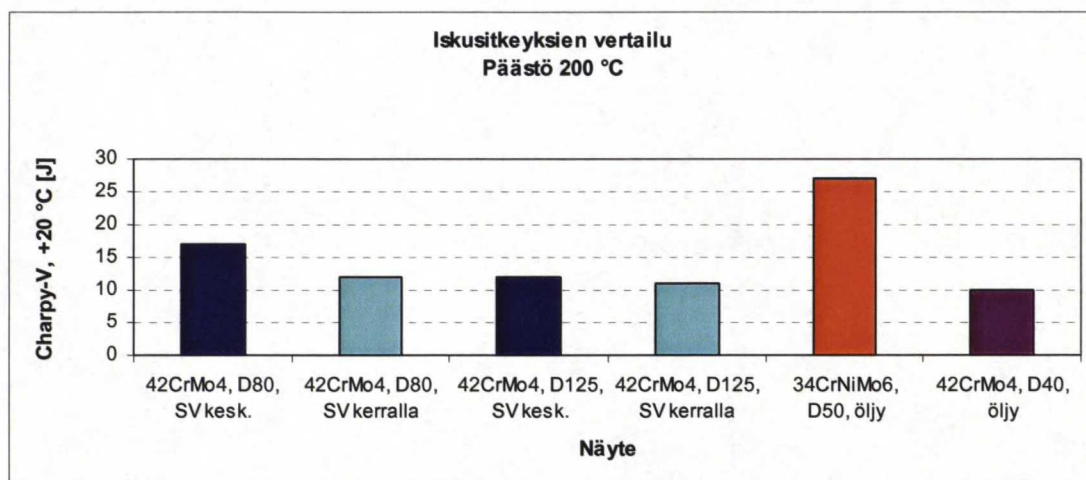
Kuva 82 Jäännösjännitysten vertailu aksiaalisuunnassa eri terästen ja sammutustapojen välillä.

Kuvasta on havaittavissa, että käyttämällä suolavesiliuosta sammutusväliaineena öljyn sijasta päästään huomattavasti suurempaan pinnan puristusjäännösjännitystilaan. Syynä tähän on suuremmat kovuserot kappaleen pinnan ja sisustan välillä.

Aivan pintaan saadut puristusjäännösjännitystilat vastaavat hiiletyksessä ja induktiokarkaisussa saatavia jännitystiloja. Syvyyttä saadaan huomattavasti enemmän kuin hiiletyskarkaisussa ja syvyys ylittää jopa induktiokarkaisussa parhaimmillaan saadut arvot /59, 60/.

11.1.5 Iskusikey

Kuvassa 83 on esitetty keskiarvot kunkin kappaleen iskusikeydelle sekä lisäksi vertailun vuoksi raportissa /48/ esitetyt tulokset öljysammutetuille 42CrMo4 sekä 34CrNiMo6 -teräksille.



Kuva 83 Iskusikeyksien vertailu eri terästen ja sammutustapojen välillä, SV on suolavesi

Tutkituilla sammutustavoilla ei näytä olevan merkitystä iskusikeyteen, koska kaikki 42CrMo4 -teräksen arvot ovat niin lähellä toisiaan. Ainoastaan suolaveteen keskeytetysti sammutetulla halkaisijaltaan D80 olevalla kappaleella näyttäisi olevan hieman korkeampi iskusikeyden arvo. Sen lämpötila on tasaantunut yli 200 asteen, joten sen pinta on päästynyt korkeammassa lämpötilassa, mikä lisää iskusikeyttä kuvan 18 mukaisesti. 34CrNiMo6 -teräksen korkeampi iskusikeysarvo selittyy alhaisemmalla hiilipitoisuudella ja korkeammalla nikkelipitoisuudella. Hiilipitoisuus alentaa voimakkaasti iskusikeysarvoja ja nikkelipitoisuus puolestaan parantaa niitä. Muut seosaineet, teräksen mikrorakenne ja käsittelyhistoria vaikuttavat myös iskusikeysarvoihin. /61/

11.1.6 Mitta- ja muodonmuutokset

Kuvissa 58...65 olevien tulosten perusteella mitta- ja muodonmuutoksiin vaikuttaa eniten kappaleen koko. Kaikille kappaleille on yhteistä se, että niiden päädyt painuvat kuopalle. Itse asiassa ne eivät kuitenkaan painu kuopalle vaan kappaleiden reunat pitenevät tapahtuvan martensiittitarnsformaation seurauksena, kuva 84 /62/.

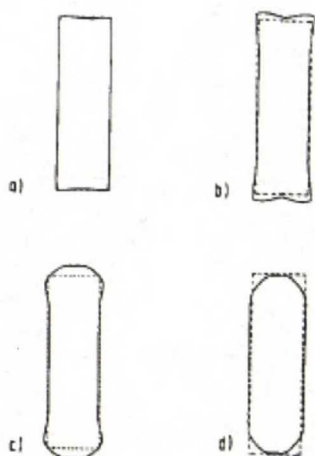


Bild 13. Formen von Zylindern mit 30 mm Durchmesser und 100 mm Länge aus Werkstoffen unterschiedlicher Einhärtung nach Abschreckung von 850 °C in Wasser
a) Werkstoff, der unter diesen Bedingungen vollständig zu Perlit umwandelt.
b) Werkstoff, der unter diesen Bedingungen durchhärtert.
c) Werkstoff, der unter diesen Bedingungen bis zu 55 % des Radius 100 % Perlit bildet (ZTU-Schaubild 52, vgl. Bilder 2 und 4-6)
d) Werkstoff, der unter diesen Bedingungen bis zu 75 % des Radius 100 % Perlit bildet (ZTU-Schaubild 34, vgl. Bilder 2 und 4-6)

Fig. 13. Shape of cylinders with 30 mm diameter and 100 mm length after quenching in water for different transformation characteristics
a) transformation only the pearlite.
b) through hardening.
c) transformation characteristic 52 (see fig. 2 and 4-6)
d) transformation characteristic 34 (see fig. 2 and 4-6)

Kuva 84 Sylinterimäisessä koekappaleessa tapahtuvat muodonmuutokset karkaisun aikana. /62/

Tarkasteltaessa sammutustavan ja halkaisijan vaikutuksia syntyviin mittamuutoksiin, kuvat 58...61, voidaan yleisesti todeta keskeytetyn sammutuksen aiheuttavan suuremmat mittamuutokset kuin kerralla tapahtuva sammutus etenkin kohdissa, joissa tapahtuu kutistumista. Huomattavin ero on halkaisijaltaan 84 mm olevalla kappaleella mittauskohdissa D3 ja D4. Siinä kohdassa on mahdollisesti tapahtunut jokin systemaattinen mittausrvirhe, koska mittaustuloksissa ei ole suurta hajontaa. Pisteiden välillä olevat suuret erot mittauskohdissa D1 ja D2 selittyvät sillä, että mittaukset on tehty eri päistä kappaletta. Painaummat päädyissä ovat hieman syvemmät keskeytetyssä sammutuksessa.

Tarkasteltaessa päästön ja halkaisijan vaikutuksia syntyviin mittamuutoksiin, kuvat 65...68, havaitaan, ettei päästö lämpötilassa 200 °C vaikuta mittoihin kovinkaan paljon. Päästö näyttäisi hieman pienentäneen kappaleiden mittoja, kuten kuvasta 18 oli arvattavissakin, mutta ei kuitenkaan mitenkään merkittävästi. Erot selittyvät myös tuloksissa olleilla keskihajonnoilla. Pisteiden välillä olevat suuret erot mittauskohdissa D1 ja D2 selittyvät sillä, että mittaukset on tehty eri päistä kappaletta.

Halkaisijoissa tapahtuvat mittamuutokset vaihtelevat mittauskohdan sekä -suunnan mukaan. Erot selittyvät vaihtelevilla jäähtymisnopeuksilla. Ensimmäisenä sammutusväliaineeseen osuva kohta jäähtyy nopeammin ja siten siihen syntyy enemmän martensiittia, jonka seurauksen kohdan ominaistilavuus kasvaa enemmän kuin hitaammin jäähtyvän kohdan. Tämä ilmiö selittää myös kaikissa kulmakohdissa tapahtuvan suuremman mittojen kasvun. Kulmakohdissa sammutusväliaine pääsee

jäähdyttämään kappaletta periaatteessa kahdelta suunnalta, jolloin jäähtyminen on erittäin nopeaa.

Tarkasteltaessa mittamuutoksia ja kappaleen halkaisijaa havaitaan kaikkien kappaleiden paisuvan johdonmukaisesti vain aivan päädyistä eli mittauskohtien D1 ja D2 kohdalta. Muissa mittauskohdissa mitat kasvavat vain halkaisijalla D50, mutta jo halkaisijalla D80 samassa kohtaa tapahtuu kutistumista. Tämä selittyy sillä, että halkaisijaltaan 50 mm oleva kappale karkenee läpi. Halkaisijaltaan 80 mm olevan kappaleen keskustaan martensiittia muodostuu vähemmän, jolloin sen ominaistilavuus ei kasva niin paljoa.

Tutkitunlaisia aksiaalisia kappaleita ei voida saatujen mittamuutosten perusteella käyttää sellaisenaan tarkkoihin koneenosiin. Mittamuutokset ovat kuitenkin kohtuullisesti ennakoitavissa ja tullaan toimeen muihin karkaisumenetelmiin verrattuna tavanomaisilla viimeistelykoneistustyöväroilla. Tarvittava viimeistelykoneistus ei ohenna merkittävästi karkaisukerrosta tai muuta jäännösjännitystilaa.

11.1.7 Mikrorakenne

Kuvien 66 ja 67 mikrorakenteiden, kuvien 48...50 kovuusjakaumien ja kuvan 47 kappaleiden todellisten jäähtymisnopeuksien sekä kuvassa 34 olevan teräksen 42CrMo4 jatkuvan jäähtymisen käyrän perusteella kaikkien kappaleiden pintakerrokset ovat oleellisesti martensiittia. Seassa saattaa olla myös hieman bainiittia. Halkaisijaltaan 50 mm olevan kappaleen keskustan rakenne on myös oleellisesti martensiittinen, mutta siinä voi olla hieman bainiittia. Suurempien kappaleiden keskustan rakenne on oleellisesti bainiittinen, mutta mukana voi olla hieman ferriittia ja martensiittia.

Kaikkien kappaleiden pinnoissa oli havaittavissa kuvan 74 vasemman puoleisen kuvan mukainen pintakerros, joka on todennäköisesti seurausta hapettumisesta panosta uunista sammutukseen nostettaessa.

11.2 Simulointi

Simuloimalla saatu jominykäyrä saatiin vastaamaan hyvin kyseiselle teräkselle laskettua jominykäyrää, kuten kuvasta 69 on nähtävissä.

Simuloimalla saadut tulokset suolavesikarkaisussa eivät kuitenkaan vastaa mittaamalla saatuja tuloksia. Kuvissa 74 ja 76 olevista jäähtymiskäyristä havaitaan kunkin halkaisijan jäähtyvän simuloinnissa huomattavasti nopeammin kuin todellisissa mittauksissa. Nopeamman jäähtymisen seurauksena kovuusjakaumatkaan eivät vastaa toisiaan vaan simuloimalla saadaan suurempia kovuuksia. Syy simuloinnissa tapahtuvaan liian nopeaan jäähtymiseen on todennäköisesti sisäänsyötetyn materiaalidatan puutteellisuudet. Käytetty lämmönjohtavuus saattaa olla liian suuri, mikä selittäisi etenkin keskustan huomattavasti nopeamman jäähtymisen. Simulointi ei

myöskään ota huomioon faasimuutosten yhteydessä syntyvää lämpöä. Käytetyt lämmönsiirtokertoimet saattavat myös olla liian suuria, koska ne on laskettu jäähtymiskäyrästä, joka on saatu huomattavasti pienemmällä, halkaisijaltaan 12 mm olevalla kappaleella suoraan sammutusaltaasta. Suuremmista kappaleista vapautuu enemmän lämpöä sammutusväliaineeseen, mikä hidastaa lämmönsiirtymistä kappaleesta pois ja näin ollen jäähtyminenkin on hitaampaa.

Verrattaessa saatuja kovuusjakaumia, kuvat 75 ja 77, on havaittavissa kappaleen D50 simuloidun ja mitatun kovuusjakauman vastaavan melko hyvin toisiaan (eroa suurimmillaan 4 HRC), vaikka jäähtymisnopeuksissa onkin suuria eroja. Tämä selittyy sillä, että todellisuudessaakin kyseisen kappaleen jäähtymisnopeus on ollut riittävän suuri martensiitin muodostamiseksi koko kappaleeseen. Kappaleella D100 kovuuseroa on huomattavasti enemmän. Kovuusero on suurimmillaan 15 HRC lähellä keskustaa kohdassa, jossa mittauksissa kovuus on pienimmillään. Tämä selittyy sillä, että todellisuudessa jäähtymisnopeus ei riitä martensiitin muodostamiseen kyseisten kappaleiden keskustassa, mutta simuloinnilla saadut jäähtymisnopeudet ovat niin suuret, että martensiittiäkin pystyy muodostumaan.

Öljykarkaisun simuloiduille jäähtymisnopeuksille ei ole vertailukohtaa mitatuista todellisista jäähtymisnopeuksista. Halkaisijoille D50 ja D100 on kuitenkin olemassa vertailukohdat simuloiduille kovuusjakaumille mitatuista kovuusjakaumista, kuvat 79 ja 81. Kappaleella D50 kovuuseroa on maksimissaan vain noin 2 HRC ja kappaleella D100 maksimissaan noin 5 HRC. Nämä eivät ole käytännössä mitenkään merkittäviä eroja etenkin, kun ottaa huomioon kovuusmittauksissa olevan virhemarginaalin. Mielenkiintoista olisi tietää miten hyvin öljysammutuksen jäähtymiskäyrät vastaavat todellisia kappaleen jäähtymiskäyriä. Lämmönsiirtokertoimien arvot saattavat öljysammutuksessa vastata paremmin todellisuutta, koska öljyn lämpötilan vaihtelulla ei ole niin merkittävää vaikutusta jäähdytystehoon kuin vedellä, vertaa kuvat 6 ja 8.

Simuloiduista kovuusjakaumista on myös havaittavissa kovuuden nousu aivan kappaleen keskustassa, kuten oli myös mitatuissa kovuusjakaumissa. Simulointi ei kuitenkaan osaa ottaa huomioon kappaleeseen valun jähmettymisen yhteydessä syntyneitä karkenevuutta parantavia suotautumia, joten selityksen täytyy olla joku toinen. Mahdollinen selitys kovuuden nousuun keskustaan mentäessä on siinä, että kriittisten faasimuutosten aikana kappale on jäähtynyt nopeammin keskustasta kuin pinnan läheltä. Yksi selitys sille voisi olla se, ettei lämpöä siirry kappaleen pinnalta sammutusväliaineeseen niin nopeasti kuin sitä johtuu kappaleen keskustasta pintaan päin.

12 Yhteenveto

Työssä perehdyttiin nopean sammutuksen teknologiaan. Käytettävänä sammutustapoina olivat sammutus kerralla kylmäksi sekä keskeytetty sammutus. Sammutuksen keskeytyksen ajankohta oli kappaleen keskustan lämpötilan ollessa noin 400 °C.

Sammutusväliaineena käytettiin suolavesiliuosta. Käytössä olevan panosprosessin soveltuvuus nopeaan sammutukseen selvitettiin mittaamalla sammutusaltaan jäähdysteho mitta-anturilla sekä mittaamalla kappaleiden todellisia jäähtymisnopeuksia. Nopealla sammutuksella saatavat ominaisuudet selvitettiin kovuustason, jäännösjännitysjakautuman sekä iskutheyden osalta. Koemateriaalina oli SFS EN 10083-1 42CrMo4 halkaisijoilla 50...100 mm. Tavoitteena oli yli 45 HRC:n kovuustaso. Myös karkaisun seurauksena tapahtuvia mittamuutoksia tarkasteltiin. Lisäksi selvitettiin hieman simuloinnin hyödyntämisen mahdollisuuksia suunniteltaessa uusien materiaalien ja prosessien käyttöönottoa.

Suolaveteen sammutuksen tuloksissa jäätiin kauaksi N.I. Kobaskon määrittämästä intensiivisen sammutuksen alueesta. Tästä voidaan päätellä, ettei käytetyillä halkaisijoilla ole mahdollista saavuttaa intensiivisen sammutuksen aluetta sammutettaessa panos tavalliseen sammutusaltaaseen. Puristusjäännösjännitystila kappaleen pinnalla on kuitenkin mahdollista saada hyväksi. Jännitystila säilyi puristuksena aina syvyyteen 10 mm saakka, lukuun ottamatta halkaisijaa D50. Öljysammutuksessa tällaisiin tuloksiin ei ole aiemmissa tutkimuksissa päästy.

Keskeytetyllä sammutuksella ei ollut oikeastaan mitään vaikutusta kappaleiden mekaanisiin ominaisuuksiin tai tapahtuviin mittamuutoksiin, kun keskeytys suoritettiin keskustan lämpötilan ollessa noin 400 °C. Keskeytys tapahtui tästä päätellen liian myöhään.

Käyttämällä päästölämpötilaa 200 °C, ei kovuudessa ja mittamuutoksissa havaittu suurtakaan muutosta päästämättömiin kappaleisiin verrattuna.

Läheltä pintaa otetuilla iskutheyssauvoilla saadut iskutheysarvot olivat huomattavasti matalammat runsashiilisemmällä ja niukemmin seostetulla 42CrMo4 -teräksellä kuin matalahiilisemmällä ja runsaammin seostetulla 34CrNiMo6 -teräksellä käytetystä sammutustavasta ja -väliaineesta riippumatta.

Jäähtymisnopeuden vaikutus saatavaan kovuustasoon niukemmin seostetun teräksen osalta oli myös tarkastelun kohteena. Nopeuttamalla niukemmin seostetun teräksen sammutusta vaihtamalla sammutusväliaine öljystä suolaveteen, saadaan kappaleiden kovuustasoa nostettua.

Kovuustulosten perusteella selvitettiin voiko öljyyn karkaistavan, runsaammin seostetun ja siten kalliimman 34CrNiMo6 -teräksen korvata suolaveteen karkaistavalla niukemmin seostetulla 42CrMo4 -teräksellä vertaamalla niiden kovuustasoa keskenään. Saaduista tuloksista huomattiin kovuustason pysyvän yhtä hyvänä tai jopa hieman korkeampana suolaveteen sammutetulla teräksellä kaikilla halkaisijoilla 15 mm syvyyteen saakka. Odotuksena olivat kuitenkin vielä hieman korkeammat 42CrMo4 -teräksen kovuustasot. Kovuustuloksista on havaittavissa vain halkaisijaltaan 50 mm olevan kappaleen kareneen läpi. Jo 80 mm halkaisijaltaan olevan kappaleen keskustan kovuustaso on huomattavasti alempi kuin pinnan.

Saatujen kovuustulosten perusteella on mahdollista korvata öljyyn karkaistava runsaammin seosettu ja siten kalliimpi 34CrNiMo6 -teräs suolaveteen karkaistavalla 42CrMo4 -teräksellä ainakin halkaisijaan 80 mm asti ja saada näin säästöjä materiaalikustannuksissa. Korvaaminen 100 mm asti onnistuu, mikäli käyttökohde on sellainen, että tavoitekovuudesta 45 HRC voidaan tinkiä. Korvaaminen ei kuitenkaan ole mahdollista, jos vaaditaan 34CrNiMo6 -teräksen kaltaisia iskusitkeyksiä. Materiaalikustannusten lisäksi hyötynä on siirtyminen ympäristölle ystävällisempään sammutusväliaineeseen.

Simuloimalla saadut tulokset eivät vastaa suolavesisammutuksen kokeellisia tuloksia jäähtymisnopeuden ja kovuusjakauman osalta. Jos simulointia haluttaisiin hyödyntää, täytyisi siitä tehdä rutiini. Pitäisi myös hankkia tarkka materiaalidata kaikilta osin, koska sillä on erittäin suuri vaikutus simuloinnin oikeellisuuteen. Simuloinnin käyttöönotto ja hyödyntäminen vaatii paljon panostusta, mikä ei tämän työn aikataulutavoitteen puitteissa ollut mahdollista. Tällä hetkellä, jos ei tarvitse usein tehdä muutoksia materiaalien valinnassa ja lämpökäsittelyissä, on melkein helpompaa tehdä käytännön kokeita, kuin käyttää numeerista simulointia tarpeellisten muutosten tekemiseen piirustuksiin ja prosessiin.

Mikäli keskeytetyllä sammutuksella halutaan parantaa materiaaliominaisuuksia, täytyisi keskeytys suorittaa aikaisemmassa vaiheessa kuin tässä tutkimuksessa. Oikean ajanhetken löytäminen sammutuksen keskeytykselle vaatii jatkotutkimuksia. Kappaleissa tapahtuvien epätasaisesta jäähtymisestä johtuvien mitta- ja muodonmuutosten saaminen kuriin voisi onnistua paremmin paineistetussa vesisumutuksessa, jossa kappaleet karkaistaan yksitellen. Menetelmä vaatisi kuitenkin aivan uudenlaisen laitteiston.

13 Kirjallisuusviitteet

- /1/ R. Hill Jr, High-Pressure Gas Cooling: The Case of Hydrogen, Heat Treating Progress, January/February 2006, s. 30-32
- /2/ P.F. Stratton, Hydrogen Economy, A Study of Gas Quenching Costs, Heat Treating Progress, March/April 2006, s. 53-55
- /3/ A.M. Freborg, B.L. Ferguson, M.A. Aronov, N.I. Kobasko & J.A. Powell, Intensive Quenching Theory and Application for Imparting High Residual Surface Compressive Stresses in Pressure Vessel Components, Journal of Pressure Vessel Technology, May 2003, vol. 125, s.188-194
- /4/ IQ Technologies Inc, IntensiQuenchSM Process Theory and Applications, April 2002, luettu 13.7.2006, [www-dokumentti], <<http://www.IntensiveQuench.com>>
- /5/ S. Kivivuori & S. Härkönen, Lämpökäsittelyoppi, Tammer-Paino Oy, Tampere 2004, 287 s.
- /6/ G. Krauss, Principles of Heat Treatment of Steel, American Society for Metals, 1980, 291 s.
- /7/ C.E.Bates & G.E.Totten, Application of Quench Factor Analysis to Predict Hardness under Laboratory and Production Conditions, Conference Proceedings Quenching and Distortion Control, ASM International, 1992, s. 33-39
- /8/ S. Claudinon, P. Lamesle, J.J. Orteu & R. Fortunier, Continuous in situ Measurement of Quenching Distortions using Computer Vision, Journal of Materials Processing Technology 122, 2002, s. 69-81
- /9/ Shuhui Ma, Characterization of the performance of mineral oil based quenchants using CHTE Quench Probe System, A Thesis Submitted to the Faculty of the Worcester Polytechnic Institute in Partial fulfillment of the requirements for the Degree of Master in Materials Science and Engineering, June 27, 2002
- /10/ D.S. MacKenzie, The History of Quenching, Advanced Materials & Processes, September 2006, s.39-40
- /11/ J.Hasson, Quenchants: Yesterday, Today and Tomorrow, Conference Proceedings Quenching and Distortion Control, ASM International, 1992, s.13-15
- /12/ D.S. MacKenzie, Advances in Quenching: A Discussion of Present and Future Technologies, Presented at the ASM Heat Treating Show and Exposition, Indianapolis, IN, September 15-18, 2003

- /13/ SFS-EN ISO 642, Teräksen karkenevuuden määrittäminen irtapinnan sammutuskokeen avulla (Jominykoe), 2000-01-24, 1. painos, SFS-käsikirja, Lämpökäsittelytekniikka 2002, s. 373-413
- /14/ ASM Handbook, Volume 4, Heat Treating, 1991, s. 67-120
- /15/ F. Boitout, D. Dry, P. Mourgue, Y. Gooroochurn & H. Porzner, SYSWELD for Heat Treatment and Part Designers, Presentation of an Engineering Simulation Solution for Heat Treatment, 31 s.
- /16/ K-E Thelning, Steel and its Heat Treatment, Bofors Handbook, Butterworths London and Boston, 1975, 570 s.
- /17/ M.A. Aronov, N.I. Kobasko, J.F. Wallace, D. Schwam & J.A. Powell, Practical Application of Intensive Quenching Technology for Steel Parts, Industrial Heating, April 1999, s. 59-63
- /18/ H. Kress, Diplomityö, Iskuvasaraterän induktiokarkaisu, Tampereen Teknillinen Korkeakoulu, Konetekniikan osasto, 1989, 78 s.
- /19/ N.I. Kobasko, M.A. Aronov, J.A. Powell, L.C.F. Canale & G.E. Totten, Improved Production of Automotive Parts by Intensive Quench Processing, la Metallurgia Italiana, 2/2006, s. 13-22
- /20/ G.E. Totten, N.I. Kobasko & L.C.F. Canale, Mechanism of Surface Compressive Stress Formation by Intensive Quenching, MECOM 2005 – VIII Congreso Argentino de Mecánica Computacional
- /21/ Houghton PLC, Houghton on Quenching, 61 s.
- /22/ S. Segerberg, Miljövänliga alternativ till mineraliska härdoljor för härdning av stål, IVF-rapport 93003, 25 s.
- /23/ J. Virta, Lämpökäsittelyn sammutusmenetelmät, MET-julkaisu 1.97, 34 s.
- /24/ J. Virta, J. Karlund & V. Christiansen, Lämpökäsittelyn sammutusmenetelmät, Teknillinen loppuraportti, Raportti VALB348, VTT Valmistustekniikka, Espoo 28.8.1998
- /25/ S. Segerberg & J. Bodin, Polymerkylmedel som alternativ till härdoljor vid värmebehandling, IVF-resultat 84506, Mars 1985, 52 s.
- /26/ L.C.F. Canale & G.E. Totten, Quenching Technology: A Selected Overview of the Current State-of-the-art, Materials Research, vol 8, No. 4, 2005, s. 461-467

- /27/ R.W. Hertzberg, Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials, Fourth Edition, John Wiley & Sons, Inc., 1996, s. 279-281
- /28/ S.W. Han, S.G. Yun & G.E. Totten, Continuously Variable, Agitation in Quench System Design, Conference Proceedings Quenching and Distortion Control, ASM International, 1992, s. 119-126
- /29/ R.T. von Bergen, The Effects of Quenchant Media Selection Control on the Distortion of Engineered Steel Parts, Conference Proceedings Quenching and Distortion Control, ASM International, 1992, s. 275-282
- /30/ S. Segerberg & J. Bodin, Kylningens inverkan på hårdheten vid härdning av stål, IVF-resultat 84621, 1984, 36 s.
- /31/ A. Jokilaakso & T. Kaskiala, Siirtoilmiöiden perusteet, Liikemäärän-, lämmön- ja aineensiirron oppikirja, Osa II A Lämmönsiirto, Espoo 2003, s. 301-442
- /32/ J.A. Powell, Understanding Intensive Quenching, Industrial Heating, August 2002, s. 38-39
- /33/ G.E. Totten, N.I. Kobasko & J.A. Powell, Overview of Intensive Quenching Processes, Industrial Heating, April 2002, s. 31-33
- /34/ M.A. Aronov, N.I. Kobasko & J.A. Powell, EMTEC CT-76-II, Industrial-Scale Intensive Quenching Process for Tool Products Commercialization, Final Report, August 2005
- /35/ N.I. Kobasko, Basics of Intensive Quenching, Advanced Materials & Processes 9/95, s. 42W-42Y
- /36/ N.I. Kobasko, Part IV: Basics of Intensive Quenching, Advanced Materials and Processes 12/99, s. H31-H33
- /37/ N.I. Kobasko, Part II: Basics of Intensive Quenching, Advanced Materials & Processes 8/96, s. 40CC-40EE
- /38/ N.I. Kobasko, Part III: Basics of Intensive Quenching, Advanced Materials & Processes 2/98, s. 36FF-36HH
- /39/ Hardox, mahdollisuuksien kulutuslevy -esite Fi-7, SSAB Oxelösund, 1997
- /40/ Weldom -esite Fi-6, SSAB Oxelösund, 1996

- /41/ R. Kübler, S. Zhang, H. Müller & D. Löhe, Simulation of Stresses, Residual Stresses and Distortion in Specimens of AISI 52 100 During Gas Quenching, ASM International Heat Treating Congress, 5th ASM Heat Treatment and Surface Engineering Conference in Europe, 7-9 June 2000, s. 31-42
- /42/ V.S. Nemkov & R.C. Goldstein, Practical Use of Computer Simulation for Advanced Induction Coil and Process Design, ASM International Heat Treating Congress, 5th ASM Heat Treatment and Surface Engineering Conference in Europe, 7-9 June 2000, s. 65-72
- /43/ R.A. Wallis, Modeling Quenching the State of yhr Art, Advanced Materials & Processes 9/95, s. 42KK-42NN
- /44/ J. Lütjens, V. Heuer, F. König, T. Lübben, V. Schulze & N. Trapp, Computer Aided Simulation of Heat Treatment (C.A.S.H.), Teil 2: Bestimmung von Eingabedaten zur FEM-Simulation des Einsatzhärtens, Härterei Technische Mitteilungen, 1/2006, s. 10-17
- /45/ M. Ehlers, J. Güttler & J. Schwerzer, Computer Aided Simulation of Heat Treatment (C.A.S.H.), Teil 1: Ein Überblick, Härterei Technische Mitteilungen, 1/2006, s. 5-9
- /46/ J. Rohde, A. Thuvander & A. Melander, Using Thermodynamic Information in Numerical Simulation of Distortion due to Heat Treatment, ASM International Heat Treating Congress, 5th ASM Heat Treatment and Surface Engineering Conference in Europe, 7-9 June 2000, s. 21-29
- /47/ J. Sointula, Sandvik Mining and Construction Oy, Breakers Lahti, kirjallinen tiedonanto, 10.5.2006
- /48/ M. Vestman, Loppuraportti, P228, Sandvik Mining and Construction Oy, Breakers Lahti, sisäinen raportti, 1998
- /49/ IVF Smart Quench, User's Manual, Version 2.2, 4th edition, September 2004, 58 s.
- /50/ C. Swanson, Optimal Temperature Sensor Selection, Heat Treating Progress, May/June 2006, s. 47-53
- /51/ N.I. Kobasko, Quenching Apparatus and Method for Hardening Steel Parts, United States Patent, Patent no. US 6,364,974 B1, Apr. 2, 2002
- /52/ SFS-EN ISO 6508-1, Metallien Rockwellin kovuuskoe, Osa 1: Menetelmä (asteikot A, B, C, D, E, F, G, H, K, N ja T), 17.4.2000
- /53/ M. Hakanen, Sandvik Mining and Construction - X-Ray Measurements on Test Samples, Report no. #621, Stresstech Oy, sisäinen raportti, 19.10.2006, 29 s.

- /54/ SFS-EN 10 045-1, Metallien iskukoe, Charpyn V- ja U-koe, Osa 1: Menetelmä, 21.12.1990
- /55/ D. Hömberg, A Numerical Simulation of the Jominy end-quench-test, *Acta Materialia*, Volume 44, Number 11, November 1996, s. 4375-4385
- /56/ E. Tobolski, Uncertainties in Rockwell Hardness Tests, Part I, *Advanced Materials & Processes*, April 2003, volume 161, no. 4, s. 26-29
- /57/ E. Tobolski, Uncertainty in Hardness Testing, Part II, *Advanced Materials & Processes*, May 2003, volume 161, no. 5, s. 25-26
- /58/ K-E. Thelning, Varför spricker stål vid härdning, *Jernkont. Ann.* 154, 1970, s. 10-23
- /59/ B. Clausen, F.Hoffmann, H.W. Zoch & P.Mayr, Randschichtschädigung beim Härten und Einsatzhärten von Stählen, *Härterei Technische Mitteilungen*, no. 1, 2005, s.12-18
- /60/ H. Fahry, H-W Zoch und H. Schlicht, Entstehung von Eigenspannungen und Verzügen bei der induktiven Randschichthärtung von Bauteilen, *AWT-Arbeitsgemeinschaft Wärmebehandlung und Werkstofftechnik, Induktives Randschichthärten*, AWT-Tagung 23. bis 25. März 1998 Darmstadt, s. 209-228
- /61/ ASM Handbook, vol. 1, Properties and Selection: Irons, Steels and High-Performance Alloys, 1990, s. 737-754
- /62/ M. Wildau & H. Hougardy, Einfluss der Einhärtungstiefe auf Spannungen und Massänderungen zylindrischer Körper aus Stahl, volume 42, no. 5, 1987, s. 269-277

		Sammutus		Päästö							
Ø [mm]	Merkki	Ker- ralla	Kesk.	200	Ei	Pinta- kovuus	Kovuus- jakauma	Isku- sitkeys	Jään- nösjän- nitykset	Mi- tat	Todellinen- jäähdytys- nopeus
50	C0	x		x		x	x				
	C1	x		x		x			x		
	C3Y/Ä	x		x		x				x	
	C4	x		x							x(3 mm)
	C5	x			x	x	x				
	C6	x			x	x					
	C8Y/Ä	x			x	x				x	
	E0		x	x		x	x				
	E1		x	x		x			x		
	E3Y/Ä		x	x		x				x	
	E4		x	x							x (1,5 mm)
	E5		x		x	x	x				
	E6		x		x	x					
	E8Y/Ä		x		x	x				x	
80	H0	x		x		x	x	x			
	H1	x		x		x			x		
	H3Y/Ä	x		x		x				x	
	H4	x		x							x (3 mm)
	H5	x			x	x	x				
	H6	x			x	x					
	H8Y/Ä	x			x	x				x	
	I0		x	x		x	x	x			
	I1		x	x		x			x		
	I3Y/Ä		x	x		x				x	
	I4		x	x							x (1,5 mm)
	I5		x		x	x	x				
	I6		x		x	x					
	I8Y/Ä		x		x	x				x	
100	K0	x		x		x	x				
	K1	x		x		x			x		
	Y/Ä K3	x		x		x				x	
	K4	x		x							x (3 mm)
	K5	x			x	x	x				
	K6	x			x	x					
	Y/Ä K8	x			x	x				x	
	N0		x	x		x	x				
	N1		x	x		x			x		
	Y/Ä N3		x	x		x				x	
	N4		x	x							x (1,5 mm)
	N5		x		x	x	x				
	N6		x		x	x					
	Y/Ä N8		x		x	x				x	

Teknillinen korkeakoulu
Materiaali- ja kalliotekniikan
osaston kirjasto
PL 6200 (Vuorimiehentie 2)
02015 TKK